

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS



# ANÁLISIS TÉRMICO DE LA APLICACIÓN DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN CLIMATIZACIÓN

---

Área de Térmica

Autora: María Almudena Ruano San José  
Tutor: Amancio Moreno Rodríguez





## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
NOMENCLATURA .....	10
AGRADECIMIENTOS .....	13
1. RESUMEN .....	15
2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVO DEL PROYECTO .....	17
2.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	17
2.1.1. NECESIDAD DE AHORRO ENERGÉTICO .....	17
2.1.2. NECESIDAD DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO .....	19
2.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	20
3. ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS CIENTÍFICO- TÉCNICOS: SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA .....	23
3.1. ALMACENAMIENTO TÉRMICO .....	23
3.2. ALMACENAMIENTO POR CALOR SENSIBLE .....	23
3.3. ALMACENAMIENTO POR REACCIÓN QUÍMICA .....	26
3.4. ALMACENAMIENTO POR CALOR LATENTE: MATERIALES DE CAMBIO DE FASE .....	27
3.5. CONCLUSIONES DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO .....	28
4. MATERIALES DE CAMBIO DE FASE .....	29
4.1. INTRODUCCIÓN .....	29
4.2. TIPOS DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE .....	30
4.2.1. PCM ORGÁNICOS/INORGÁNICOS .....	31
4.2.2. PCM COMERCIALIZADOS .....	35
4.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS PCM .....	36
4.4. APLICACIONES DE LOS PCM .....	38
4.5. INCORPORACIÓN DE PCM EN MATERIALES CONSTRUCTIVOS .....	41
4.5.1. INTRODUCCIÓN .....	41
4.5.2. ENCAPSULAMIENTO DE PCM .....	42



4.5.3. EJEMPLO DE INCORPORACIÓN DE PCM EN LA CONSTRUCCIÓN. PROTOTIPO MAGIC BOX .....	45
4.6. CONCLUSIONES DE PCM.....	47
<b>5. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO .....</b>	<b>49</b>
5.1. UBICACIÓN .....	49
5.2. DATOS CLIMATOLÓGICOS .....	49
5.3. DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA. ....	50
<b>6. CARGAS TÉRMICAS .....</b>	<b>53</b>
6.1. INTRODUCCIÓN .....	53
6.2. CONDICIONES DE DISEÑO.....	54
6.2.1. CONDICIONES DEL AMBIENTE TÉRMICO INTERIOR.....	54
6.2.2. AMBIENTE EXTERIOR.....	55
6.3. DEFINICIÓN DE LA ENVOLVENTE TÉRMICA DEL EDIFICIO Y CLASIFICACIÓN DE SUS COMPONENTES .....	56
6.4. CARGAS TÉRMICAS DE CLIMATIZACIÓN.....	57
6.4.1. CARGAS TÉRMICAS DE TRANSMISIÓN .....	57
6.4.2. CARGAS TÉRMICAS DEBIDAS A LA RADIACIÓN .....	63
6.4.3. CARGAS TÉRMICAS DEBIDAS A LA VENTILACIÓN.....	64
6.4.4. CARGA TÉRMICA POR INFILTRACIONES .....	66
6.4.5. CARGAS TÉRMICAS DEBIDAS A LOS OCUPANTES .....	67
6.4.6. CARGAS TÉRMICAS DEBIDAS A LA ILUMINACIÓN .....	68
6.4.7. CARGAS TÉRMICAS DEBIDAS A EQUIPOS .....	69
6.5. CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS CON PCM .....	70
6.5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS .....	70
<b>7. RESULTADOS.....</b>	<b>83</b>
7.1. ELECCIÓN DEL PCM.....	83
7.2. CANTIDAD DE PCM NECESARIA .....	88
7.2.1. MURO UNITARIO.....	88
7.2.2. VIVIENDA CON PCM EN PAREDES EXTERIORES.....	89
7.3. EFECTOS DEL PCM SOBRE LA CARGA TÉRMICA .....	93
7.4. AHORRO OBTENIDO .....	99





---

<b>8. ELECCIÓN DE AIRE ACONDICIONADO .....</b>	<b>101</b>
<b>9. ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL.....</b>	<b>103</b>
9.1. INTRODUCCIÓN.....	103
9.2. CÁLCULO DE EMISIONES.....	104
<b>10. ESTUDIO ECONÓMICO .....</b>	<b>109</b>
10.1. INTRODUCCIÓN .....	109
10.2. CÁLCULO DEL COSTE INICIAL DE LA INSTALACIÓN.....	109
10.3. AHORRO ECONÓMICO.....	110
10.4. PERIODO DE AMORTIZACIÓN .....	111
10.4.1. MÉTODO DE BA .....	111
10.4.2. MÉTODO DEL PAY-BACK .....	113
<b>11. CONCLUSIONES.....</b>	<b>117</b>
11.1. CONCLUSIONES FINALES.....	117
11.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	118
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>125</b>
ANEXO I: CÁLCULO DE CARGAS .....	125
ANEXO II: DATOS TÉCNICOS AIRE ACONDICIONADO .....	131
ANEXO III: PLANO DE LA VIVIENDA.....	133



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de varios medios de almacenamiento de calor.....	25
Tabla 2: Propiedades de diversos materiales de cambio de fase. ....	35
Tabla 3: Propiedades químicas de los PCM.....	36
Tabla 4: Propiedades termofísicas de los PCM. ....	37
Tabla 5: Posición del solar. ....	49
Tabla 6: Superficies de cada dependencia.....	52
Tabla 7: Condiciones interiores de diseño. ....	54
Tabla 8: Temperaturas máximas y sus correspondientes humedades relativas. ....	55
Tabla 9: Resistencias térmicas superficiales de cerramiento en contacto con el aire exterior en $m^2K/W$ .....	58
Tabla 10: Composición del cerramiento exterior. ....	59
Tabla 11: Composición de las paredes interiores.....	60
Tabla 12: Composición del techo de interior a exterior.....	61
Tabla 13: Composición del suelo del interior a exterior.....	62
Tabla 14: Composición de la puerta.....	62
Tabla 15: Factor de corrección para superficies acristaladas.....	63
Tabla 16: Caudal mínimo exigido de ventilación. ....	65
Tabla 17: Temperaturas máximas por meses.....	65
Tabla 18: Cálculo de calor sensible debido a ventilaciones. ....	65
Tabla 19: Datos obtenidos con Psicro.....	66
Tabla 20: Datos en el interior de la vivienda. ....	66
Tabla 21: Cargas térmicas latentes debidas a la ventilación.....	66
Tabla 22: Número mínimo de personas en función del número de dormitorios. .....	67
Tabla 23: Cargas térmicas debidas a los ocupantes. ....	68
Tabla 24: Comparativa de consumos de bombillas incandescentes con bombillas de bajo consumo. ....	68
Tabla 25: Número de bombillas por habitación. ....	69
Tabla 26: Número de bombillas en función de su potencia. ....	69
Tabla 27: Consumo medio de equipos de una vivienda unifamiliar. ....	70
Tabla 28: UA resultantes.....	72
Tabla 29: Composición y propiedades del muro. ....	75
Tabla 30: Coeficiente global de transmisión de calor. ....	76
Tabla 31: Propiedades de los PCM elegidos para la simulación. ....	83
Tabla 32: PCM elegido. ....	88
Tabla 33: Cantidad de PCM muro simple.....	89
Tabla 34: Coeficientes de transmisión térmica. ....	90



---

Tabla 35: Porcentaje de días sin obtener líquido en función de la masa de PCM. Hipótesis 1. ....	91
Tabla 36: Porcentaje de días sin obtener líquido en función de la masa de PCM. Hipótesis 2. ....	92
Tabla 37: Tabla comparativa de los resultados del día 6 de Junio de 2010 .....	96
Tabla 38: Tabla comparativa de los resultados del día 6 de Julio de 2010. ....	99
Tabla 39: Demandas totales durante todo el verano. ....	100
Tabla 40: Cargas térmicas pico con y sin PCM [kW]. ....	101
Tabla 41: Precios del equipo de aire acondicionado Split Mural Inverter BGT- R410 A. ....	101
Tabla 42: Precios del equipo de aire acondicionado Split Mural Inverter BGY. .....	102
Tabla 43: Demanda térmica y consumo eléctrico durante el verano para ambos equipos. ....	102
Tabla 44: Demandas no atendidas y consumo eléctrico por meses. ....	105
Tabla 45: Factores de emisión del Mix Eléctrico español en 2010. ....	105
Tabla 46: Ahorro de emisiones de diversos gases contaminantes. ....	105
Tabla 47: Emisiones de gases contaminantes con el uso de PCM. ....	106
Tabla 48: Emisiones de gases contaminantes sin el uso de PCM. ....	106
Tabla 49: Inversión inicial. ....	110
Tabla 50: Gastos en electricidad durante el verano. ....	111
Tabla 51: Valores de BA para cada año. ....	112
Tabla 52: Periodo de retorno en función del aumento en % del precio del kWh de la electricidad. ....	115
Tabla 53: PCM elegido. ....	117

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de energía final por sectores.....	19
Figura 2: Gráfica del comportamiento durante almacenamiento sensible.....	24
Figura 3: Diagrama de la actuación de PCM. ....	30
Figura 4: Clasificación de los materiales que se utilizan para la acumulación de energía térmica.....	31
Figura 5: Comparativa de la capacidad calorífica de distintos materiales.....	33
Figura 6: Comparativa de los calores latentes de diferentes PCM comerciales. 36	
Figura 7: PCM disponibles. ....	37
Figura 8: Evolución del número de publicaciones sobre PCM. ....	38
Figura 9: Ejemplo de macroencapsulación .....	43
Figura 10: Microcápsulas de PCM en un tejido.....	44
Figura 11: Foto de la vivienda durante el periodo en el que estuvo construida en Washington.....	46
Figura 12: Evolución de la temperatura interior con los ventiladores apagados. ....	47
Figura 13: Temperaturas máximas y mínimas de Junio a Septiembre de 2010..	50
Figura 14: Plano vista planta de la vivienda.....	52
Figura 15: Orientaciones de las fachadas. ....	56
Figura 16: Esquema de la composición de la fachada. ....	58
Figura 17: Esquema de la composición del techo .....	60
Figura 18: Esquema de resistencias del muro .....	74
Figura 19: Esquema del comportamiento de la carga térmica en un ciclo de fusión del PCM. ....	76
Figura 20: Efecto del incremento de la masa de PCM.....	77
Figura 21: Carga térmica durante el día 26 de Junio de 2010.....	78
Figura 22: Esquema del proceso de cambio de fase del PCM del muro unitario. ....	79
Figura 23: Carga térmica del día 6 de Junio de 2010. ....	79
Figura 24: Carga térmica del día 6 de Julio de 2010.....	80
Figura 25: Demanda térmica durante el día 9 de Agosto de 2010.....	80
Figura 26: Relación masa PCM en función del número de días con PCM líquido con $h_f$ similares. ....	84
Figura 27: Relación días con PCM líquido en función de la masa de PCM con $T_f=28^{\circ}\text{C}$ .....	84
Figura 28: Relación días con PCM líquido en función de la masa de PCM necesaria para $T_f<28^{\circ}\text{C}$ .....	85
Figura 29: Carga térmica $T_f=25^{\circ}\text{C}$ (A), $T_f=27^{\circ}\text{C}$ (B), $T_f=29^{\circ}\text{C}$ (C), $T_f=31^{\circ}\text{C}$ . ....	86
Figura 30: Relación de masa de PCM en función de días con PCM líquido.....	87



---

Figura 31: Relación masa de PCM con número de días sin alcanzar estado líquido. Hipótesis 1.....	91
Figura 32: Relación de masa de PCM con el número de días sin obtener líquido. Hipótesis 2. ....	92
Figura 33: Carga térmica sin $Q_o$ sobre las fachadas del día 6 de Junio de 2010..	93
Figura 34: Carga térmica con $Q_o$ del día 6 de Junio de 2010. Hipótesis 1.....	94
Figura 35: Ahorro conseguido en el interior de la vivienda. Hipótesis 1.....	95
Figura 36: Carga térmica con $Q_o$ del día 6 de Junio de 2010.....	95
Figura 37: Temperaturas durante el día 6 de Julio de 2010. ....	97
Figura 38: Carga térmica sin $Q_o$ del día 6 de Julio de 2010. Hipótesis 1.....	97
Figura 39: Carga térmica total con $Q_o$ del día 6 de Julio de 2010. Hipótesis 1 ...	98
Figura 40: Carga térmica del día 6 de Julio de 2010. Hipótesis 2.....	99
Figura 41: Ahorro diario en kWh .....	100
Figura 42: Emisiones de $CO_2$ . ....	106
Figura 43: Ahorro en las emisiones con el uso de PCM.....	107
Figura 44: Evolución de BA.....	113
Figura 45: Evolución del precio del kWh. ....	114
Figura 46: Periodo de retorno para distintos aumentos sobre el precio de la electricidad.....	114
Figura 47: PCM en los textiles.....	119



## NOMENCLATURA

$\Delta T$	Incremento de temperatura.
A	Área.
b	Ancho.
c	Alto.
clo	Grado de vestimenta.
e	Espesor.
E <sub>int</sub>	Energía interna.
FS	Factor de simultaneidad.
h <sub>e</sub>	Coeficiente de convección externa.
h <sub>f</sub>	Calor Latente de Cambio de Fase.
h <sub>i</sub>	Coeficiente de convección interior.
I <sub>T</sub>	Radiación solar.
K <sub>LÍQUIDO</sub>	Resistencia térmica del PCM en estado líquido.
K <sub>SÓLIDO</sub>	Resistencia térmica del PCM en estado sólido.
M	Masa.
met	Actividad metabólica.
PCM	Phase Change Material.
PM10	Partículas en suspensión con diámetros menores a 10 micras.
PM5	Partículas en suspensión con diámetros menores a 5 micras.
POT	Potencia.
PPD	Porcentaje estimado insatisfechos.
Q <sub>lat</sub>	Calor latente.
Q <sub>s</sub>	Calor Sensible.
RAA	Residuos de alta actividad.



RMA	Residuos de media actividad.
Rt	Resistencia térmica.
SAE	Sistema de almacenamiento de energía.
TES-PCM	Thermal Energy Storage with Phase Change Materials.
Text	Temperatura exterior.
Tf	Temperatura de fusión.
Tint	Temperatura interior.
T <sub>PCM</sub>	Temperatura del material de cambio de fase.
U	Coeficiente de transmisión.
UA	Coeficiente global de transmisión.
VOC	Compuestos orgánicos volátiles.
$\lambda$	Conductividad térmica.
$\rho$	Densidad.
$\varphi$	Factor de corrección.



**ANÁLISIS TÉRMICO DE LA  
APLICACIÓN DE MATERIALES DE  
CAMBIO DE FASE EN CLIMATIZACIÓN**

**Departamento de  
Ingeniería Térmica y de  
Fluidos**

---





## AGRADECIMIENTOS

Quisiera dedicar unas líneas a todas esas personas que me han apoyado y demostrado que nunca me fallarán y siempre estarán ahí.

En primer lugar quisiera agradecer todo el apoyo de mi familia en especial a mis padres, hermanas, cuñados y suegros que han demostrado su interés sobre el desarrollo de este proyecto. Además agradecer a mi hermana Sara, los grandes momentos que me ha dado cada vez que no podía continuar.

También les quiero dar las gracias a todos mis compañeros de la universidad con los que he compartido tan buenos momentos y de los que estoy muy segura que será difícil olvidar.

Agradecer también que una de las personas más importantes de mi vida, Alberto, haya dedicado tanto tiempo a escucharme, ayudarme, hacerme sonreír y hacerme olvidar las preocupaciones. Sin él no hubiera sido lo mismo.

Y por último, agradecer a mi tutor Amancio todo lo que ha aportado en este proyecto, sus correcciones y por supuesto su apoyo.

Muchas gracias a todos por ser parte de estos últimos 6 años de mi vida y haberlos hecho increíbles.



**ANÁLISIS TÉRMICO DE LA  
APLICACIÓN DE MATERIALES DE  
CAMBIO DE FASE EN CLIMATIZACIÓN**

**Departamento de  
Ingeniería Térmica y de  
Fluidos**

---

## 1. RESUMEN

El presente estudio aborda la utilización de materiales de cambio de fase (PCM) con vistas a lograr una mejora de la eficiencia energética en climatización. Aumentando la inercia térmica de los muros del edificio y aprovechando la capacidad calorífica de los materiales de cambio de fase se puede ahorrar una cantidad significativa de energía.

Bien se conoce la necesidad de una gran energía para cambiar la materia de fase, y que durante dicho cambio permanece constante la temperatura. También se sabe que muchas reacciones químicas requieren o producen calor. Estos dos sistemas se han empleado para acumular energía térmica en los últimos años. Productos a base de hidrocarburos, como son entre otros las parafinas, han sido los más empleados a pesar que su precio esté ligado al del petróleo.

En este proyecto se han analizado las características de los PCM, la determinación del PCM más adecuado para su inserción en los muros de la vivienda del estudio, y las temperaturas recomendadas de cambio de fase. Además se han recopilado las diversas posibilidades para su incorporación en la construcción.

En estos momentos se puede decir que el intervalo de  $-30$  a  $100^{\circ}\text{C}$  está cubierto con diversos materiales PCM. Son materiales que no deben variar sus propiedades con el tiempo, compatibles con los que habitualmente se utilizan en la construcción, plásticos o metales, que no tienen problemas tóxicos o de manipulación y que son de precio reducido, aunque no despreciable.

Se deben tener en cuenta dos aspectos importantes, uno es la capacidad de almacenamiento, y otro la potencia térmica disponible y la facilidad de su carga. Mientras que la primera está en función de la masa y del calor latente, en la segunda interviene el área, el coeficiente global de transmisión y el salto de temperatura.

Por todo lo dicho se puede deducir que las posibilidades del empleo de los PCM son grandes y muy diversas en la construcción. El problema técnico no puede separarse nunca del económico, y como estos materiales tienen cierto coste, debe optimizarse o racionalizar su empleo. Por esta última razón, uno de los objetivos de este proyecto es el cálculo de la cantidad necesaria de PCM instalada en las fachadas de una vivienda.



**ANÁLISIS TÉRMICO DE LA  
APLICACIÓN DE MATERIALES DE  
CAMBIO DE FASE EN CLIMATIZACIÓN**

**Departamento de  
Ingeniería Térmica y de  
Fluidos**

---

## 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVO DEL PROYECTO

En este capítulo se cita el objetivo principal propuesto en este proyecto y los objetivos intermedios utilizados para conseguirlo.

Como justificación, se expone un breve resumen del panorama energético internacional, y se subraya el papel del almacenamiento de energía térmica en la edificación a lo largo de la historia, como contribución al ahorro energético.

Se analizan las ventajas del uso de materiales de cambio de fase y su importancia en la contribución al ahorro energético de las futuras construcciones.

### 2.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

#### 2.1.1. NECESIDAD DE AHORRO ENERGÉTICO

El problema de la energía, reconocido actualmente, en cuanto a un problema de abastecimiento, no es tanto su escasez, como por el hecho de que nunca ha faltado realmente, ni siquiera durante las crisis del petróleo de 1973 y 1978, sino que creemos que nunca llegará a faltar. Si fuese escasa, la utilizaríamos más razonablemente; pero al ser abundante se derrocha. Este derroche viene fundamentado de la necesidad que tiene el ser humano de usar la energía para sus actividades y desarrollo.(Lecuona Neumann, 2009).

Es a partir de los años setenta del pasado siglo XX, con la crisis del petróleo, cuando los países industrializados toman conciencia de la necesidad de ahorrar energía. Las tres razones fundamentales que llevan a esta conclusión son:

- Conforme ha ido aumentando el nivel y calidad de vida de las sociedades industrializadas se ha incrementado el consumo energético, lo que ha originado la desaparición progresiva de los recursos energéticos.
- El deseo de paliar los efectos negativos del uso abusivo de combustibles fósiles, que ha supuesto la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Consecuencias: el incremento del efecto invernadero y la lluvia ácida.

- La necesidad de abaratar los costes energéticos para disminuir la competitividad entre las industrias.

Aún tomando conciencia en el siglo XX, hoy en día, es necesario un cambio de paradigma en el modelo energético de las sociedades del siglo XXI. La dependencia energética, agotamiento y encarecimiento de combustibles fósiles y el cambio climático son algunas las razones que nos llevan a pensar en alguna solución.

Durante este periodo de conciencia del problema, las soluciones pasan por una gran cantidad de iniciativas de gran calado científico-tecnológico (Del Pozo Pérez, 2010):

- Biocombustibles.
- Mayor eficiencia energética de los procesos.
- Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Energías renovables.

Nuestra forma de vida se asienta en la energía barata y abundante. Casi en su totalidad procede de fuentes fósiles no renovables. Hemos tocado techo en el descubrimiento y extracción de combustible. La población humana se verá afectada en breve plazo. Estas son algunas de las causas y consecuencias de nuestro uso de los recursos disponibles. El consumo de energía por sectores se ve reflejado en la Figura 1.

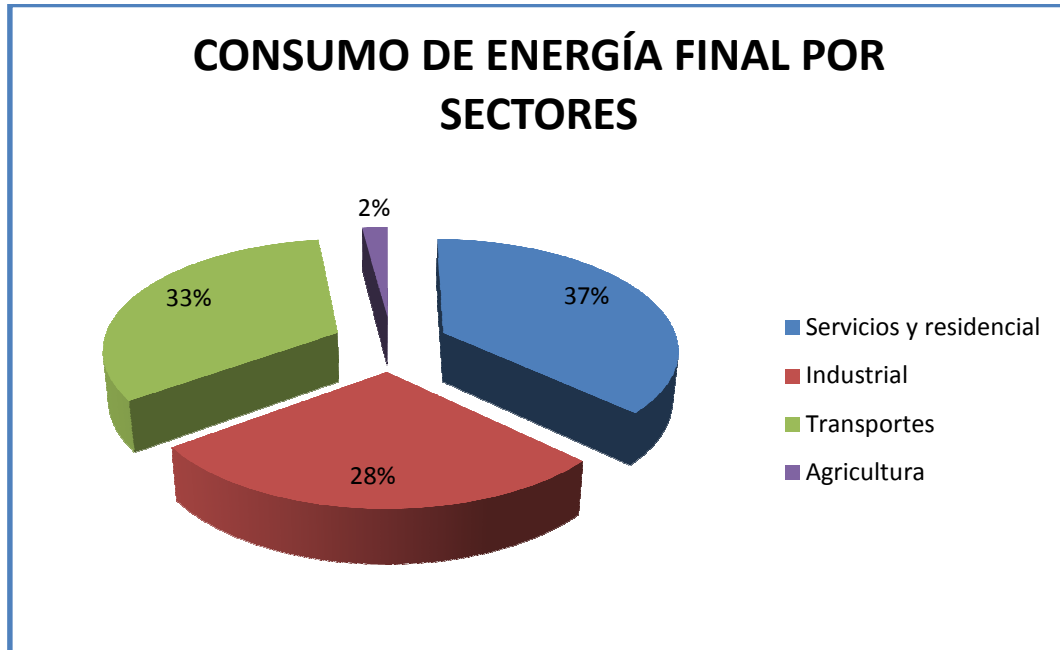


Figura 1: Consumo de energía final por sectores (Terés Zubiaga, Campos Celador, Pérez Iribarren, González Pino, & Sala Lizarraga, 2011)

El sector que mayor uso de energía realiza es el sector servicios y residencial, dado que uno de los principales gastos en energía de la sociedad de hoy en día es dedicado a la climatización. Es y sería recomendable buscar una solución para disminuir ese consumo sin afectar al confort de la persona.

### 2.1.2. NECESIDAD DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO

La necesidad de almacenar energía en forma de calor, proviene del hecho de que una parte considerable de la energía consumida se pierde en forma de calor hacia el exterior. Una forma de no perder ese calor y poder utilizarlo a posteriori, es almacenándolo y evitando su pérdida al ambiente.

La necesidad de buscar formas de almacenamiento térmico, en que el ahorro energético tenga una componente importante es fundamental, ya que no sólo permite reducir gastos, sino también limitar el uso de los combustibles tradicionales.(Abhat, 1983).

En los últimos años los sistemas de almacenamiento de energía térmica (SAE) están suscitando un gran interés ya que nos permite adaptar los periodos de suministro a los de demanda energética, por lo que constituyen un gran

potencial para la mejora de la eficiencia energética. Entre sus múltiples aplicaciones relacionadas con el ahorro energético están:

- Reserva de excedentes térmicos y energías renovables de forma gratuita y utilizarlos en el momento preciso, diferente al de suministro.
- Reducción y moderación de la demanda eléctrica evitando los consumos pico, a través de:
  - Optimización de rendimientos y eficacia de los sistemas de cogeneración de electricidad haciendo coincidir la demanda de calor-frío con la demanda eléctrica.
  - Uso efectivo del calor excedente procedente de procesos de combustión y otros procesos industriales.

Se observa así un drástico incremento de las publicaciones sobre el tema de almacenamiento térmico, en particular sobre TES-PCM (Thermal Energy Storage with Phase Change Materials, almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase) en fechas muy recientes. No obstante, este número es todavía limitado para el interés social que presenta en la actualidad cualquier procedimiento de uso eficiente de la energía.

A nivel nacional se ha podido constatar cierto interés de estas investigaciones a través de la existencia de grupos de investigación en otras universidades (Barcelona, Lérida, Zaragoza y Madrid), así como dentro del CSIC o centros de investigación como Inasmet.

## 2.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

En este proyecto se va a diseñar y analizar la utilización de materiales de cambio de fase en una vivienda unifamiliar. Al incorporar materiales de cambio de fase multiplicamos las prestaciones térmicas de un cerramiento convencional, sin mermar sus cualidades físicas y mecánicas, reduciendo así la demanda energética del edificio y contribuyendo a mejorar las condiciones de habitabilidad.

El objetivo de este proyecto es triple, el primero y más importante es tecnológico y consiste en determinar el PCM idóneo de las fachadas de la



vivienda en cuestión. El segundo es cuantificar la eficiencia energética y, derivado de este estudio, el beneficio medioambiental que se produce en la construcción con este tipo de cerramientos. Y el tercero y último, es realizar una valoración económica del proyecto, así como analizar la posible rentabilidad del mismo.

Para realizar este estudio se ha procedido de la siguiente manera:

- Descripción de los diferentes sistemas de almacenamiento de energía térmica y justificación del uso del sistema de almacenamiento por calor latente.
- Descripción de las características de los materiales de cambio de fase y sus aplicaciones haciendo hincapié en su incorporación en materiales constructivos.
- Descripción detallada de la vivienda y su ubicación, incluyendo:
  - Datos meteorológicos (temperaturas exteriores y radiación solar).
  - Condiciones interiores de confort.
  - Ubicación de la vivienda, distribución de las habitaciones en la planta y análisis de la influencia de la orientación de las fachadas y ventanas.
- Cálculo de cargas de climatización y descripción detallada del cálculo de la carga con el uso de PCM.
- Elección del PCM a través del análisis de la influencia de diversas propiedades termofísicas sobre la carga térmica.
- Cantidad de PCM necesaria para distintos casos: para un muro unitario de un metro cuadrado de superficie y para una vivienda unifamiliar.
- Análisis de los efectos positivos del uso de materiales de cambio de fase en la demanda térmica total de la vivienda.



- Dadas las necesidades previas y posteriores de la vivienda a la incorporación de PCM, determinación del equipo de climatización adecuado.
- Estudio del impacto ambiental mediante el cálculo de emisiones y ahorro de las mismas.
- Estudio económico indicando la inversión inicial, ahorro y plazo de amortización (utilizando dos herramientas de análisis del plazo de amortización, BA y Pay-back).

Por último, el proyecto finaliza con un resumen de los resultados obtenidos y un análisis de la viabilidad de la incorporación de este tipo de materiales en los cerramientos de edificios. Además se incluye un último apartado donde se exponen las últimas tendencias de uso de PCM en el ámbito de la construcción y otros sectores.

### 3. ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS: SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA

En este capítulo se estudian las diferentes formas de almacenamiento de energía térmica que se han desarrollado hasta nuestros días: sus propiedades, y se profundiza el estudio en el almacenamiento por calor latente indicando sus propiedades y sus aplicaciones en función de sus características.

#### 3.1. ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Existen tres posibilidades de almacenamiento de energía térmica que se investigan en la actualidad (Zalba 2002):

- Por calor *sensible*, es decir, por aumento o descenso de la temperatura del material acumulador.
- Por calor *latente*, aprovechando la entalpía asociada a un cambio de fase.
- Por *reacción termoquímica*, aprovechando el calor puesto en juego en la reacción.

#### 3.2. ALMACENAMIENTO POR CALOR SENSIBLE

Los sistemas de almacenamiento por calor sensible se basan en el principio según el cual la fase del material energético que se almacena no cambia durante la transferencia de calor. Esta energía almacenada es igual al cambio de energía interna ( $U$ ) que sufre el material al cambiar su temperatura y viene a ser igual al calor sensible ( $Q_s$ ).

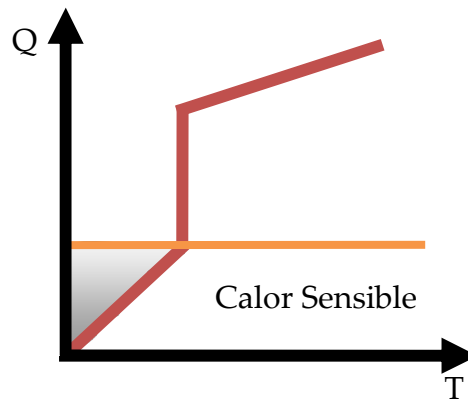


Figura 2: Gráfica del comportamiento durante almacenamiento sensible. (Elaboración propia)

El almacenamiento se lleva a cabo aumentando la temperatura del material; por ello, es necesario que dicho medio tenga una capacidad térmica elevada, estabilidad a largo plazo bajo la oscilación térmica, compatibilidad con sus contenidos y lo más importante, un bajo coste.

Diversos tipos de materiales líquidos, sólidos y combinaciones de líquidos y sólidos, pueden almacenar energía por cambios de temperatura.

Una regla de tipo práctico para determinar si un material es apropiado para utilizarse como medio de almacenamiento, es que este debe ser capaz de almacenar entre 300 y 600 kJ/°C por m<sup>2</sup> de área de colector, como mínimo.

También encontramos que cuanto mayor sea la temperatura que pueda alcanzar el medio de almacenamiento, tanto menor será el tamaño del sistema, aunque las pérdidas se hacen más evidentes. Por ejemplo, 1000 litros de agua pueden almacenar aproximadamente 84 MJ de energía cuando su temperatura aumenta de 30 a 50 °C y 168 MJ cuando la temperatura varía de 30 a 70 °C.

Nótese que se requieren aproximadamente 2,5 m<sup>3</sup> de rocas para almacenar la misma cantidad de energía con los mismos incrementos de temperatura.

Tipos de almacenamiento por calor sensible:

- *Almacenaje en líquidos.*
  - *Almacenamiento en agua.* Uno de los mejores medios de almacenamiento de energía térmica por su alto calor específico, mayor que muchos otros materiales, y su bajo coste y alta

disponibilidad. Sin embargo, debido a su alta presión de vapor, requiere instalaciones preparadas para esta desventaja.

- *Almacenamiento en agua salada.* Los lagos solares son un simple y económico método de alto almacenaje de energía solar en forma de energía térmica de baja temperatura (50-95°C).
- *Almacenamiento en otros líquidos.* Los sustitutos más comunes al uso del agua son los aceites basados en petróleo y las sales fundidas. La principal ventaja de estos líquidos es su capacidad de trabajar a altas temperaturas sobrepasando los 300°C, cuando el agua crearía altas sobrepresiones.
- *Almacenaje en sólidos.* Es utilizado para el almacenaje de calor de baja e incluso alta temperatura. El almacenaje en sólidos es una buena opción para evitar las sobrepresiones que limitan el diseño durante el almacenaje en líquidos.
  - *Almacenamiento con rocas.* Se realizan lechos con rocas donde el fluido que transporta el calor entra por conducción en las rocas, dejando el calor almacenado. La energía acumulada en este tipo de almacenamiento depende, a parte de las propiedades termofísicas del material, de diversos parámetros, incluyendo el tamaño y forma de las rocas, la densidad de empaquetamiento, el fluido transportador de calor, etc.

Property	Heat Storage Material			
	Sensible heat storage		Phase Change Materials	
	Rock	Water	Organic	Inorganic
Latent heat of fusion (kJ/kg)	*	*	190	230
Specific heat (kJ/kg)	1.0	4.2	2.0	2.0
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2240	1000	800	1600
Storage mass for storing 10 <sup>6</sup> kJ (kg)	67000	16000	5300	4350
Relative mass**	15	4	1.25	1.0
Storage volume for storing 10 <sup>6</sup> kJ (m <sup>3</sup> )	30	16	6.6	2.7
Relative volume**	11	6	2.5	1.0

\*Latent heat of fusion is not of interest for sensible heat storage.

\*\*Relative mass and volume are based on latent heat storage in inorganic phase change materials

Tabla 1: Comparación de varios medios de almacenamiento de calor. (Hasnain, 1998)

- *Almacenamiento en construcciones.* Este tipo de almacenamiento puede ser aplicado en nuevas y viejas edificaciones, además pueden ser integrados con sistemas de distribución aire y agua. Uno de los usos más comunes de este tipo de almacenamiento es el calentamiento del suelo. El suelo supone una gran superficie que irradia a baja

temperatura usando el hormigón como medio de almacenamiento térmico.

- *Almacenamiento en metales.* Mayoritariamente para almacenaje en altas temperaturas entre 120 y 1400°C. Ejemplos: aluminio, magnesio y zinc.

### 3.3. ALMACENAMIENTO POR REACCIÓN QUÍMICA

Uno de los usos del almacenamiento por reacción química es el almacenamiento de la energía solar. Estas deben ser reacciones endotérmicas reversibles que se invierten cuando se requiere que la energía sea liberada. Para que una reacción sea utilizada en el almacenamiento de la energía solar, se requiere que:

- La reacción sea reversible.
- Los reactivos puedan hacer uso de la energía del espectro solar, tanto como sea posible.
- La energía almacenada en la reacción sea grande. Al menos del orden de 600 Wh/kg.
- Que los reactivos sean económicos.

En caso de que los productos de la reacción puedan separarse y usarse como combustibles, no se necesita que la reacción sea reversible. Un ejemplo típico es la producción de hidrógeno. Este puede ser obtenido mediante al menos 4 procesos donde se puede utilizar la energía solar: proceso térmico directo, termoquímico, electrolítico y fotolítico.

El primero de ellos necesita de temperaturas muy altas (3000°C) para descomponer el agua en sus elementos hidrógeno y oxígeno, y por lo tanto se haría necesario el uso de colectores concentradores.

En el segundo proceso se llevan a cabo una serie de reacciones químicas de diversas sustancias, generalmente también a temperaturas altas (700 - 800°C), para finalmente obtener el hidrógeno.

Si la energía solar primero se convierte en energía eléctrica mediante el uso de paneles fotovoltaicos, el agua puede ser electrolizada para producir hidrógeno. En las reacciones fotolíticas, los fotones de la radiación solar pueden ser absorbidos por el agua y cuando la energía absorbida alcanza un cierto nivel, (285,9 kJ/mol de agua), se libera el hidrógeno.

La energía solar también puede emplearse en los procesos de fermentación anaeróbica de algas para la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ). Este es estable a temperatura ambiente y al reaccionar con el oxígeno mediante una combustión, libera la energía almacenada para producir altas temperaturas.

### **3.4. ALMACENAMIENTO POR CALOR LATENTE: MATERIALES DE CAMBIO DE FASE**

La energía que una sustancia necesita para cambiar de fase, generalmente es muy superior que la que se necesita para tener incrementos de temperatura pequeños en la misma sustancia. Esto da la pauta para pensar que se puede aprovechar el cambio de fase de algunas sustancias para utilizarlas como medios de almacenamiento de energía térmica. La idea en este proyecto es que la sustancia absorba la energía térmica de forma directa (sistema pasivo) y cambie de fase. Al cambiar de fase la sustancia conserva en forma latente la energía absorbida. Esta será cedida posteriormente, cuando la sustancia regrese a su estado original.

Los cambios de fase pueden ser sólido-líquido, líquido-vapor y sólido-sólido. El cambio de fase líquido-vapor casi no se utiliza debido a que el vapor genera grandes presiones y en muchos casos no resulta práctico trabajar con este tipo de sistemas debido a que este tiene que ser diseñado para soportar presiones altas y por lo tanto se hace más complicado y costoso. Pero también podría ser un cambio en la estructura sólida-sólida como pasar de la estructura cristalina a la amorfa; o entre la cantidad de agua absorbida en un material. Por esta razón, lo que más se aprovecha son los cambios de fase líquido-sólido y sólido-sólido, aunque en esta parte sólo hablaremos del cambio de fase sólido-líquido.

Las sustancias que pueden utilizarse como medios de almacenamiento por cambio de fase sólido-líquido pueden ser muy variadas (hielo, sustancias orgánicas, sales hidratadas, compuestos inorgánicos y metales o aleaciones). Algunas tienen puntos de fusión altos por lo que se haría necesario utilizar

colectores concentradores para poder obtener altas temperaturas y provocar el cambio de fase en la sustancia.

El tener más capacidad de almacenamiento en las sustancias reduce el tamaño de los sistemas de almacenamiento. Por ejemplo, el agua líquida tiene un calor específico igual a  $4,186 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  y su calor de solidificación o fusión es igual a  $334,24 \text{ kJ/kg}$ . En consecuencia el agua puede almacenar aproximadamente 80 veces más energía al cambiar de fase, que como líquido al cambiar su temperatura en  $1^\circ\text{C}$ . Otra ventaja de estos sistemas es que liberan la energía a una temperatura casi constante.

### 3.5. CONCLUSIONES DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Una vez revisados todos los sistemas disponibles hoy día para almacenamiento energético, este proyecto se centrará en el almacenamiento térmico mediante calor latente, ya que ofrecen una serie de ventajas respecto a los otros sistemas para su uso en edificación, como son:

- Su elevada capacidad de almacenamiento energético.
- Al cambiar de fase, su temperatura se mantiene constante y así se garantizan pérdidas energéticas menores.
- No requiere la ejecución de grandes instalaciones ni procedimientos difíciles.
- La temperatura de trabajo necesaria se puede seleccionar dentro del rango de temperaturas utilizado en edificación ( $20\text{-}30^\circ\text{C}$ ). Evitando así variaciones de temperatura fuera del rango de confort.

En el siguiente capítulo se explican sus características en detalle.



## 4. MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Diferentes mecanismos actúan cuando un sólido funde o un líquido solidifica. Así pues, un cambio de fase implica transferencia de calor e incluso puede implicar transferencia de masa, subenfriamiento, absorción o cesión de calor latente.

Tanto la fase sólida como la líquida están caracterizadas por la presencia de fuerzas de cohesión debidas a la cercanía entre los átomos que las componen. En la fase sólida las moléculas vibran alrededor de posiciones fijas de equilibrio, mientras que en la fase líquida estas moléculas pierden esas posiciones de equilibrio, aunque las fuerzas de atracción y repulsión se encuentran equilibradas. La manifestación macroscópica de esta energía de vibración es lo que conocemos como energía térmica, y es la temperatura. Claramente se ve que los átomos en la fase líquida son más energéticos que en la fase sólida; así pues, antes de que un sólido funda deberá adquirir una cierta cantidad de energía para superar las fuerzas de cohesión que mantienen la estructura de sólido. Esta energía es la conocida como calor latente de cambio de fase ( $h_f$ ) del material y representa la diferencia de energía térmica (entalpía) entre las fases líquida y sólida. Está claro que para la solidificación de un líquido se requerirá la cesión de este calor latente y la estructuración de los átomos en sus posiciones de estabilidad.

La transición de una fase a otra, es decir, la absorción o cesión de calor latente tendrá lugar a una temperatura a la cual la estabilidad de la fase se rompe a favor de la otra en función de la energía disponible. Este cambio de fase tendrá lugar a la temperatura de fusión que dependerá de la presión y de otras variables termodinámicas.

La región de transición donde coexisten las fases sólida y líquida se conoce con el nombre de interfase. Su espesor puede variar desde unos pocos Angstroms hasta algunos centímetros y su microestructura puede ser muy compleja, en función de diferentes factores: del propio material, el ratio de enfriamiento, el gradiente de temperaturas en el líquido, la tensión superficial entre otros.

Finalmente, cuando nos refiramos a sustancias con un alto calor de cambio de fase, especialmente aptas para la acumulación de energía, muchas veces

utilizaremos las siglas PCM que significan Phase Change Material (Material de cambio de fase).

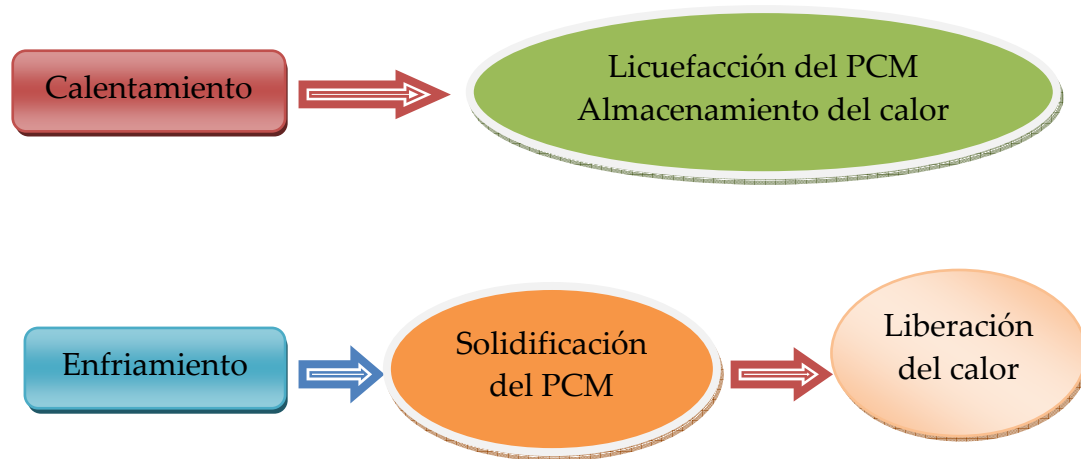


Figura 3: Diagrama de la actuación de PCM. (Elaboración propia)

Se entiende por PCM, sustancias que requieren gran energía térmica para cambiar de fase, en particular de sólido a líquido o viceversa, ese calor o frío necesario se puede aprovechar para devolverlo en el momento adecuado.

Durante mucho tiempo en grandes instalaciones se empleó como PCM el agua, en los últimos años ha caído en desuso por los problemas de sobre costo que supone, tanto inicial como por tener que emplear fluidos secundarios y bajar mucho la temperatura de evaporación de las máquinas.

## 4.2. TIPOS DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

En la Figura 4 aparece una posible clasificación de los materiales que pueden ser utilizados para la acumulación de energía térmica.

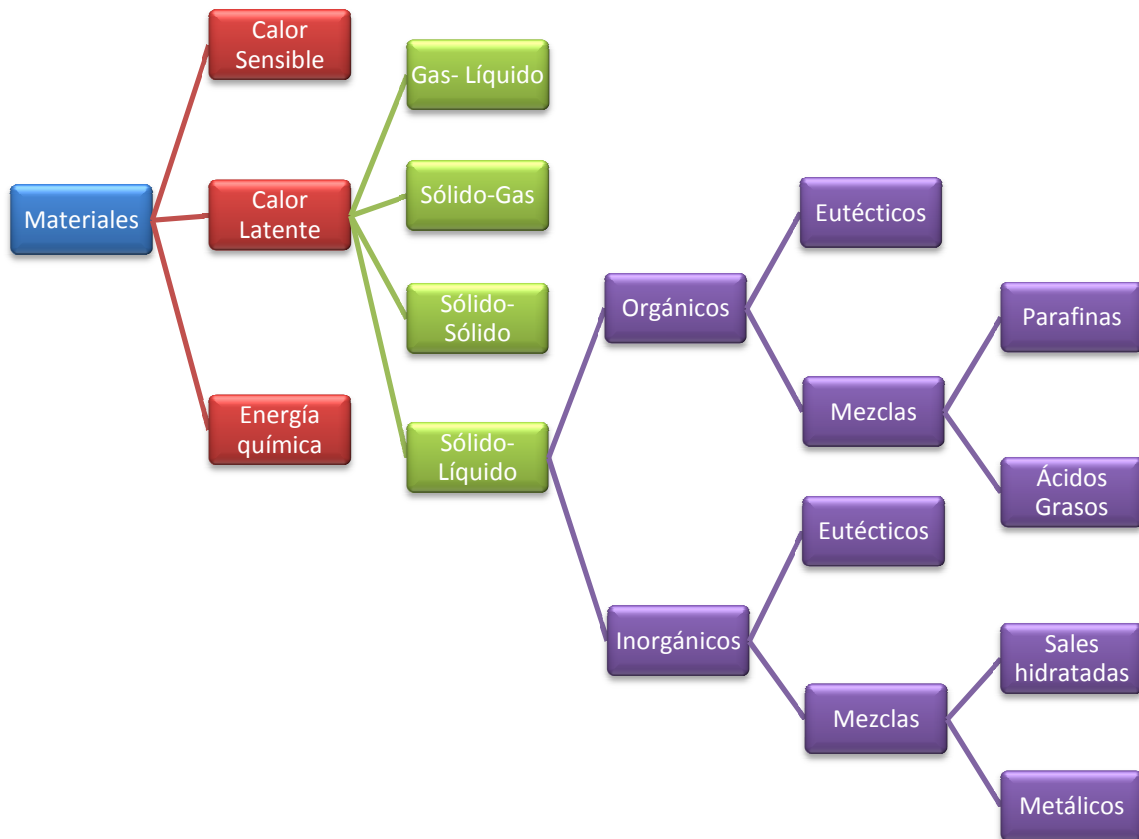


Figura 4: Clasificación de los materiales que se utilizan para la acumulación de energía térmica.  
(Vidal Jiménez, 2007)

Principalmente los PCM se pueden clasificar en materiales orgánicos e inorgánicos que son explicados en el siguiente apartado. A su vez cada uno de estos grupos puede dividirse en aquellos con propiedades eutécticas o mezclas.

Los PCM más utilizados, son aquellos denominados parafinas que aunque su coste es altamente dependiente del precio del petróleo, sus características las hacen idóneas para multitud de aplicaciones.

#### 4.2.1. PCM ORGÁNICOS/INORGÁNICOS

En primera instancia se pueden dividir en dos subgrupos: compuestos orgánicos o inorgánicos.

Los compuestos orgánicos son sustancias químicas basadas en carbono, hidrógeno y oxígeno y muchas veces con nitrógeno, azufre, fósforo, boro o

halógenos. Entre sus muchas ventajas se destacan las siguientes (Pasupathy, Velraj, & Seeniraj, 2006):

- Alto rango de temperaturas de fusión.
- No segregación.
- Químicamente estables.
- Alto calor de fusión.
- Seguros y no reactivos.
- Compatibles con materiales convencionales en la construcción.

Entre los compuestos orgánicos utilizados como materiales de cambio de fase cabe destacar las parafinas. Las parafinas son mezclas de hidrocarburos saturados, normalmente consisten en una mezcla de numerosos alcanos obtenidos durante el proceso de refinamiento del crudo de petróleo o producidas sintéticamente mediante el proceso de Fisher-Tropsch. Después del refinamiento son un producto inodoro, insípido y no tóxico. La formula general de estos hidrocarburos saturados es del tipo  $C_nH_{2n+2}$  donde  $n$  varía entre 18 y 50 (temperatura de fusión entre 30 y 90°C).

Su calor específico es de 2,1 kJ/kg·K, muy superior al de otros materiales utilizados como materiales de acumulación térmica.

Aun siendo un material orgánico, poseen un elevado calor de fusión por unidad de peso, entre 180 y 250 kJ/kg. La combinación de estos dos factores hace que tenga un excelente valor de densidad de energía acumulada (entre 54 y 71 kWh/m<sup>3</sup> en función de la parafina utilizada para una diferencia de temperatura de 20 K). Consecuentemente, este material ofrece de cuatro a cinco veces mayor capacidad de acumulación por unidad de volumen o masa que el agua cuando se trabaja con bajos gradientes de temperatura.

Las parafinas son estables hasta 250°C aproximadamente. Su viscosidad es baja en la fase líquida. Además es un líquido no polar, lo que significa que no se mezclará con otros líquidos polares como por ejemplo el agua o el alcohol. Como la mayoría de compuestos orgánicos, las parafinas tienen una baja

conductividad térmica. Esto es una desventaja, que puede ser compensada aumentando la superficie de transferencia de calor en el interior del material.

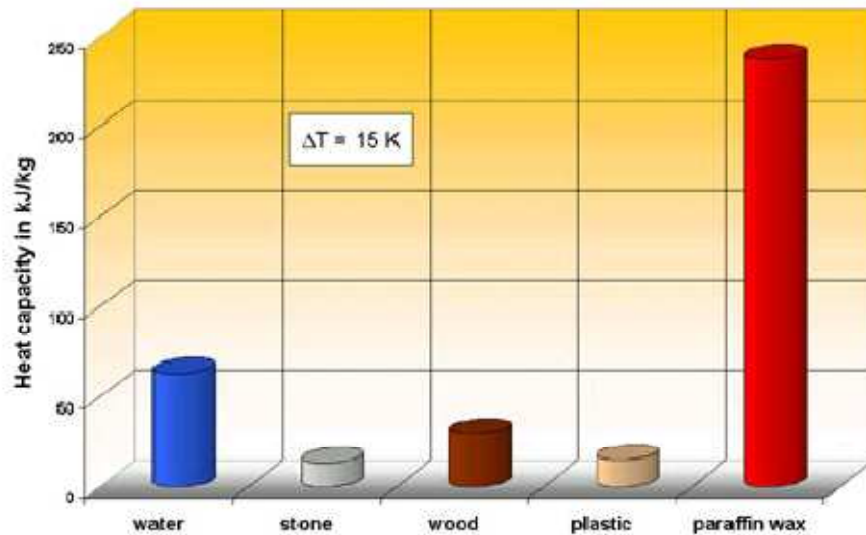


Figura 5: Comparativa de la capacidad calorífica de distintos materiales. (Vidal Jiménez, 2007)

La densidad de este material en estado líquido es de 750 a 850 kg/m<sup>3</sup>, y en estado sólido de 800 a 900 kg/m<sup>3</sup>, esto hace que su máximo volumen de expansión sea de aproximadamente de un 10% durante el proceso de cambio de fase, valor que se puede considerar como aceptable, si bien condiciona el dimensionado del contenedor.

Los PCM inorgánicos destacan por las siguientes características:

- Alta capacidad volumétrica de almacenaje de calor latente.
- Bajo coste y alta disponibilidad.
- Alta conductividad térmica.
- Alto calor de fusión.
- Bajo cambio de volumen.
- Inflamable.

Entre los componentes inorgánicos destacan las sales hidratadas. Los PCM a base de sales hidratadas han tenido problemas con el tiempo, por

envejecimientos prematuros por decantación. Recientemente han aparecido productos orgánicos que no presentan estos problemas, que no son oxidantes y no presentan problemas de dilataciones, como el hielo, y que se puede escoger la temperatura deseada de cambio de fase. Estos productos se pueden emplear en recintos plásticos con formas muy variadas: esferas, cilindros y placas. (Domínguez, Arias, García, & Culubret).

Algunos de los problemas que presentan este tipo de sales son los que mencionamos a continuación:

- En algunos casos la sal presenta un sobreenfriamiento o falla de la sal para solidificarse en la temperatura respectiva.
- Segregación de los componentes de la mezcla por efecto de la gravedad mientras se encuentra en fase líquida.
- Degradación de la sal después de varios ciclos de uso.
- Falla de los recipientes que contienen las sales debido a que estas son corrosivas.
- Áreas de contacto grandes entre la sustancia y el fluido de trabajo que transporta la energía de y hacia el tanque almacén, en caso de sistemas activos.

Algunos de estos problemas han sido resueltos parcialmente. Por ejemplo, la adición de bórax (tetaborato de sodio decahidratado) a la sal de Glauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) elimina el sobreenfriamiento provocando la cristalización entre los 28 y 29 °C, con su consecuente liberación de energía. Por otro lado, existen ciertos agentes químicos que resuelven el problema de la segregación o separación de la sustancia. Estos agentes, forman una especie de matriz microscópica que mantiene a los componentes en suspensión.

Finalmente, el problema de la corrosión en los tanques de almacenamiento se resuelve parcialmente mediante el uso de tanques hechos de diversos plásticos. El uso principal de este tipo de sistemas, que pueden ser pasivos o activos, es en el acondicionamiento calorífico de edificios y viviendas y en diversos procesos industriales.

## 4.2.2. PCM COMERCIALIZADOS

Se han estudiado diversidad de materiales para su uso como PCM, solo unas pocas se han comercializado como tales. En la Tabla 2 se muestra una lista de materiales de cambio de fase comerciales que se pueden conseguir en el mercado con sus propiedades termofísicas dadas por las compañías.

PCM	$\lambda_{\text{SÓLIDO}}$ [W/m·K]	$\lambda_{\text{LÍQUIDO}}$ [W/m·K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$h_f$ [kJ/kg]	$T_f$ [°C]
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O + MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O(4%w/w)	n.d.	n.d.	1750	125,9	20
MAGIC BOX MEZCLA HIDROC.SAT E INSAT	0,464	0,232	1110	188	23
PARAFFIN WAX (RT20)	1,8	0,2	800	140,3	23
EUTECTIC MIXTURE OF CAPRIC-LAURIC ACID	n.d.	0,139	870	171,98	23
CLIMSEL C24	0,7	0,5	1380	108	24
SP22 A4	0,6	0,6	1380	265	24
EUTECTIC MIXTURE OF CAPRIC-PALMITIC ACID	n.d.	0,143	860	196,07	24
SP22	1,3	0,6	1460	182	24
SAVENRG PCM 24P*	1,09	0,54	1820	185	25
DELTA®-COOL 24	1,12	0,56	1555	158	25
SP25 A8	0,6	0,6	1380	180	26
STL27	n.d.	n.d.	1090	213	27
S27	n.d.	n.d.	1470	207	27
AC27	1,85	1,15	867	184,78	27
CLIMSELC28	0,7	0,5	1420	162	28
RT27	0,2	0,2	870	179	28
PX27	0,1	0,1	640	112	28
GR27	0,2	0,2	750	72	28
DELTA®- COOL 28	1,12	0,56	1555	188	28
SAVENRG PCM 29P*	1,09	0,54	1840	190	29
PURE SALT HYDRATE (CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O)	1,4	1,09	1710	213,12	29
TME(63%w/w)+H <sub>2</sub> O(37%w/w)	n.d.	n.d.	1100	218	29,8

n.d. no disponible.

Tabla 2: Propiedades de diversos materiales de cambio de fase. (Elaboración propia)

El calor latente de los PCM comerciales son muy similares entre sí. En la Figura 6 se puede observar como los valores varían entre 130 y 230 kJ/kg. Son los altos calores latentes una característica que define los PCM.

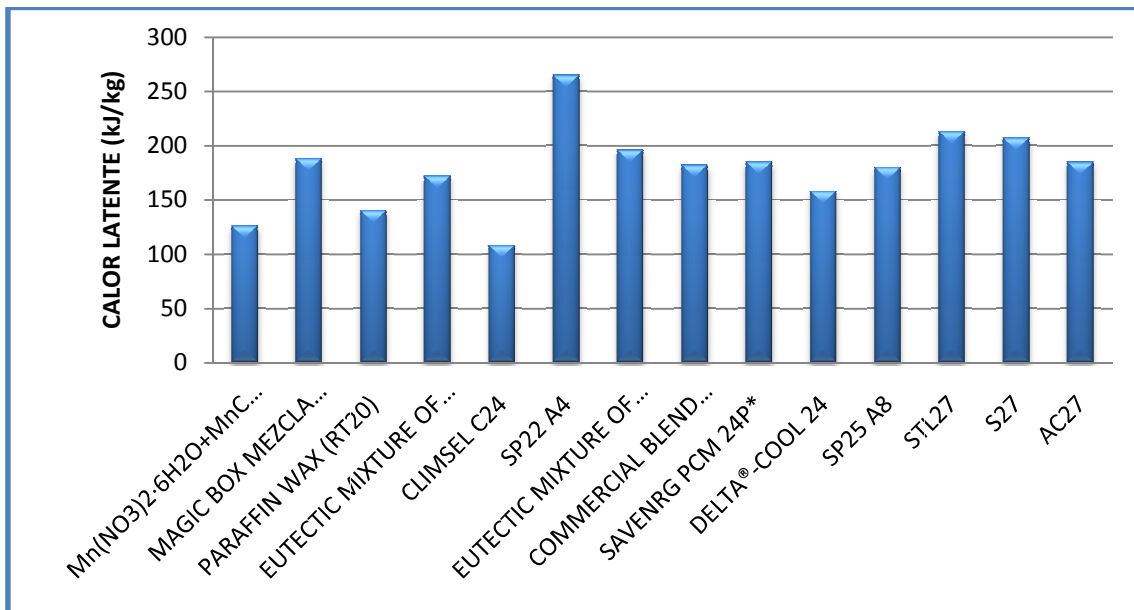


Figura 6: Comparativa de los calores latentes de diferentes PCM comerciales. (Elaboración propia)

### 4.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS PCM

Se han recopilado las principales propiedades que definen a un óptimo material de cambio de fase en la Tabla 3 y Tabla 4.

Propiedades químicas
Estabilidad química
Ciclo reversible fusión/solidificación
No degradación después de alto número de ciclos fusión/solidificación.
No tóxico, no inflamable, no contaminante, no corrosivo
No debe producirse separación entre sus fases
Compatibilidad con el material contenedor

Tabla 3: Propiedades químicas de los PCM. (Elaboración propia)



Propiedades térmicas	Propiedades físicas
Temperatura de fusión adecuada para la aplicación	Las variaciones en su volumen al cambiar de estado deben ser pequeñas
Calor latente de cambio de fase elevado	Densidad elevada
Alta conductividad	Capacidad calorífica elevada
	No debe producirse subenfriamiento
Propiedades cinéticas	Propiedades Económicas
Alto ratio de nucleación para evitar sobreenfriamiento de la fase líquida	Barato
Alto ratio de cristalización	Abundante

Tabla 4: Propiedades termofísicas de los PCM. (Elaboración propia)

A continuación en la Figura 7, se muestra la gran variedad de PCM y el alto rango de calores latentes que abarcan. En este estudio solo se ha recurrido a aquellos con temperaturas de fusión cercanas a la temperatura de confort, es decir, unos 25°C. Lo que nos reduce la elección a parafinas, sales hidratadas y ácidos grasos.

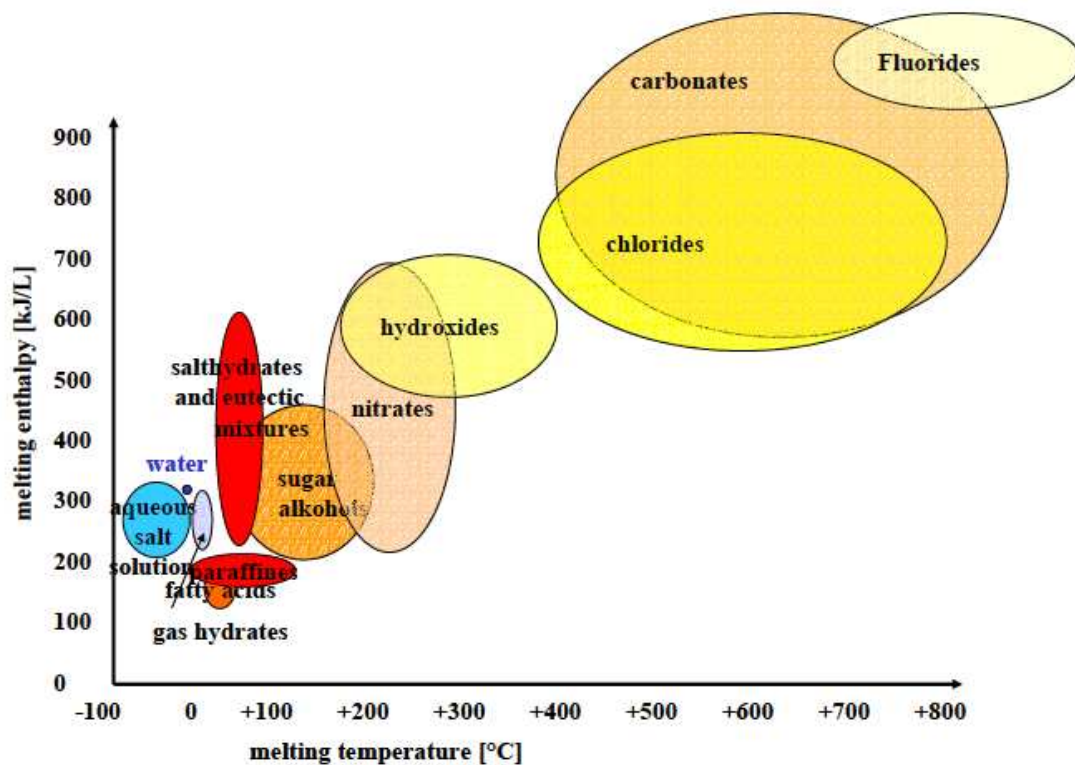


Figura 7: PCM disponibles. (Hauer, Mehling, Schossig, Yamaha, & Cabeza, 2001)

#### 4.4. APLICACIONES DE LOS PCM

El interés en incorporar los PCM en las construcciones se ha ido incrementando a lo largo de los años.

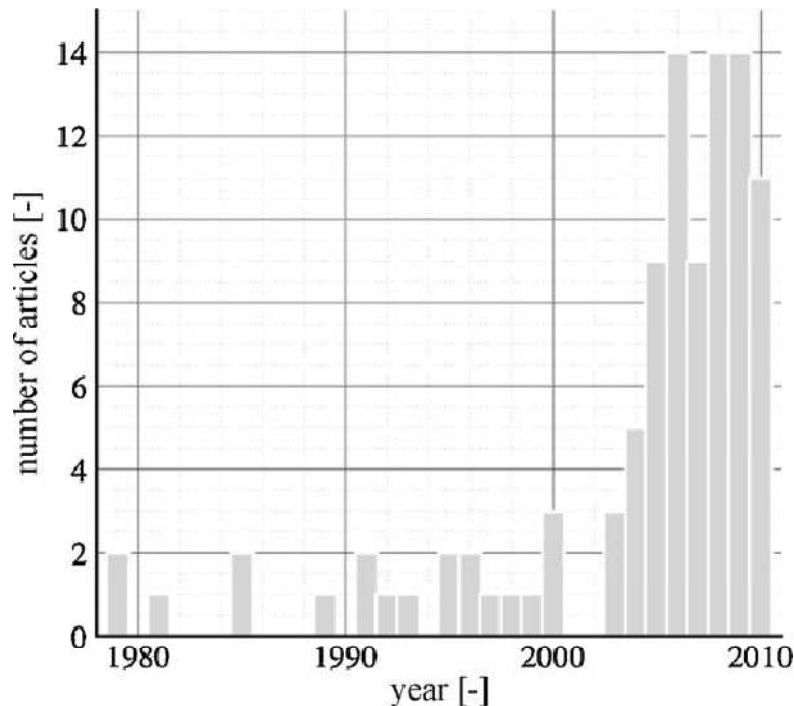


Figura 8: Evolución del número de publicaciones sobre PCM. (Kuznik, David, Johannes, & Roux, 2010)

La Figura 8 muestra la evolución de las publicaciones desde 1979 sobre materiales de cambio de fase. Se distinguen tres fases distintas: sobre 1980, otra entre 1990 y 2000 la última después del 2003. Los primeros estudios de la integración de PCM en edificios están datados desde los años 80. Luego, durante el periodo entre 1990 y 2000, el número de publicaciones por año incrementa en una publicación por año. Después de 2003, el incremento del número de publicaciones aumenta de tal forma hasta alcanzar 14 publicaciones por año. Casi el 80% de los estudios sobre PCM se han llevado a cabo los últimos pasados 8 años con los que se ha visto el desarrollo de la tecnología de encapsulación de PCM.

El cambio de fase sólido-líquido resulta de gran interés en diferentes áreas industriales. Estas áreas se pueden dividir en dos:

- Aquellas orientadas a la manufactura de materiales sólidos con unas determinadas características, entre las que cabe destacar la industria

metalúrgica, que a través de la solidificación de un metal fundido consigue una pieza previamente diseñada.

- Aquellas interesadas en aprovechar el calor latente que se genera en el propio proceso de cambio de fase. Estas a su vez se subdividen en dos: el campo del control térmico y el de la acumulación por energía térmica. En el primer caso lo que se hace es aprovechar el hecho de que durante el cambio de fase la temperatura no varía; esto resulta muy interesante en el control térmico de equipos eléctricos y electrónicos. En el segundo caso nos referimos a la acumulación de energía térmica (TES) que lo que hace es aprovechar que el calor latente de cambio de fase es más importante que el calor sensible en algunos materiales, lo cual hace que tengan una capacidad de acumulación mayor. Existe una diferencia entre estos dos campos de aplicación que es la conductividad térmica de la sustancia en cuestión. En algunos casos de protección térmica es apropiado tener valores bajos de conductividad mientras que en los sistemas de acumulación valores bajos de esta propiedad pueden conducirnos a problemas, como puede ser la incapacidad de disponer de la energía almacenada rápidamente.

A continuación se enumeran diversas aplicaciones que fueron desarrolladas desde los años 50 con un notable impulso a partir de finales de los 70:

- Interruptores electrónicos (primera aplicación).
- Envases inteligentes capaces de regular la temperatura de los alimentos (frío/calor).
- Incorporación a elementos constructivos para facilitar y abaratar el confort térmico en edificaciones.
- Aditivo en cementos y hormigones para mejorar el fraguado y las propiedades de grandes construcciones (puentes, etc.).
- Incorporación en textiles como elemento de confort térmico.
- Almacenamiento de energía térmica en energía solar de aplicación doméstica.
- Almacenamiento de energía térmica en plantas termosolares.

- Desarrollo de baterías avanzadas.
- Obtención de un mortero de revoco con propiedades de ahorro energético, mediante la utilización de micropartículas con propiedades de acumulación de calor.
- Integración de biomateriales y/o materiales reciclados como PCM.
- Aplicación de PCM en el desarrollo de ropa de trabajo para personal que actúa en situaciones de emergencia (proyecto europeo).

A continuación se exponen algunas de estas aplicaciones con más detalle.

- *Elemento pasivo de acumulación.*

En ambientes cálidos las casas normalmente se construyen con materiales ligeros. Estos materiales tienen el inconveniente de que no proporcionan suficiente masa térmica para la acumulación de calor, por lo que estas casas estarán sobrecalentadas durante el día y por la noche se enfriarán rápidamente.

Utilizando materiales de cambio de fase se puede combatir estas variaciones de temperatura. Dicha capa de materiales de cambio de fase puede ser incluida en los cerramientos exteriores de la vivienda o incluso en el interior de ella, por ejemplo en el suelo o paredes interiores. De esta manera se consigue aumentar la masa térmica de la casa y almacenar energía térmica durante el día que luego se cederá a la habitación por la noche. La gran ventaja del uso de sistemas pasivos de acumulación es el ahorro en energía en sistemas auxiliares para compensar la demanda térmica y además la posibilidad de usar la energía almacenada en momentos que se requiera de ella.

- *Sistemas de aire caliente.*

Hasta hace poco, estos sistemas solo se utilizaban en edificios industriales, oficinas, hoteles, etc. Pero actualmente su popularidad está creciendo en las casas privadas, especialmente para aquellas con un bajo consumo energético. En estos casos son necesarios unos tiempos de reacción cortos para proveer la energía térmica requerida. La utilización de energía solar, de energía de regeneración y del uso de bombas de calor con una tarifa nocturna reducida, en combinación con una unidad de acumulación por calor latente puede ser un método de calefacción muy ventajoso, desde el punto de vista económico y

energético. En este tipo de unidades de acumulación normalmente se utilizan ceras parafínicas.

La forma del material de almacenamiento hace que tenga una gran superficie de transferencia de calor que permite que el contenedor tenga cualquier forma concebible. Por otra parte, la capacidad de acumulación por unidad de volumen se ve incrementada de 3 a 5 veces con respecto a los sistemas que utilizan otros materiales como piedra, grava o arena; por lo tanto, la unidad es sensiblemente más ligera y requiere menos espacio, haciendo que su coste de construcción sea inferior.

## **4.5. INCORPORACIÓN DE PCM EN MATERIALES CONSTRUCTIVOS**

### **4.5.1. INTRODUCCIÓN**

Las viviendas de hoy en día tienden a construirse con materiales ligeros. Obteniendo como inconveniente una insuficiente masa térmica para la acumulación de calor. Para compensar las fluctuaciones de temperatura resultantes de la insuficiencia de masa térmica, se utiliza aire acondicionado durante el día y un sistema de calefacción por la noche, que funciona mayoritariamente con energía fósil. Para reducir este consumo de energía fósil puede utilizarse la energía solar pasiva. Durante las horas de sol la radiación solar puede transformarse en calor. Esta energía térmica se acumula en el hormigón de las paredes para poderlo utilizar en periodos en los que la energía solar no está disponible, por ejemplo, durante la noche. Sin embargo, a menudo no es deseable usar paredes de hormigón en viviendas nuevas pues es muy pesado.

Una solución puede ser utilizar una fina capa de materiales de cambio de fase para así aumentar la masa térmica de la casa. De este modo, las paredes almacenarán energía térmica durante el día que cederán a la habitación por la noche. Con esto, no solo se consigue un ahorro energético, sino que también un ahorro económico, pues ahorraremos el consumo de energía del aire acondicionado y del sistema de calefacción.

Un material de construcción modificado con el acumulador térmico de cambio de fase está capacitado para gestionar activamente la temperatura. De tal

manera que, en el nivel del punto de fusión, mantiene casi constante la temperatura del aire en locales de oficinas y viviendas durante el cambio de fase. Las diferencias de temperatura entre noche y día proporcionan la sucesión periódica de fusión y solidificación, es decir, de almacenamiento y desprendimiento de calor. Los valores máximos de absorción de calor son máximos durante el día, mientras que las bajas temperaturas nocturnas se utilizan para disipar este calor de la construcción sin costo alguno.

## **4.5.2. ENCAPSULAMIENTO DE PCM**

Parece lógico que el futuro del empleo de los PCM pase por su encapsulación cada vez más pequeña del orden de milímetro o hasta de micras introduciéndolos en los tejidos, en los materiales de construcción o en los circuitos de climatización.

Para evitar los inconvenientes de los PCM en los materiales constructivos, pueden encapsularse antes de ser incorporados. En los últimos años se han desarrollado importantes investigaciones sobre el encapsulado de los PCM en polímeros. La propuesta de extender las aplicaciones de los sistemas de acumulación térmica encapsulando PCM es quizás una solución al problema de transmisión térmica en el medio de almacenamiento.

Para contener los PCM los polímeros pueden presentarse en forma de macro o microencapsulados.

### **4.5.2.1. MACROENCAPSULADO**

El PCM es empaquetado en tubos, esferas, paneles u otros recipientes que, posteriormente, se incorpora a los materiales de construcción. Surgen para evitar el contacto directo de los PCM con materiales constructivos y sus consecuencias de integración entre ellos, modificación de las propiedades o drenaje del PCM.

Algunos investigadores han desarrollado métodos de encapsular los PCM primero en otros materiales como polímeros y después mezclándolo con el hormigón, para aumentar la resistencia contra el fuego y también prevenir la pérdida por goteo del PCM del hormigón. Al introducir macrocápsulas de PCM en el hormigón en masa disminuye su resistencia.



(Salyer and Sircar 1990) idearon entonces bloques de hormigón hueco en cuyo interior se colocaron recipientes que contenían PCM. Los recipientes estaban formados por un compuesto de polímero rellenos de PCM. La resistencia del hormigón no disminuye en este caso. La resistencia al fuego de estos compuestos es buena, ya que las cápsulas normalmente están totalmente rodeadas por el hormigón que no es combustible.



**Figura 9: Ejemplo de macroencapsulación. (Domínguez M. , Los acumuladores de cambio de fase en la construcción sostenible)**

Sin embargo, el macroencapsulado tiene la desventaja de que necesita protección y mucho más trabajo para integrarlo en cualquier material o sistema constructivo del edificio por lo que se encarece el proceso. Otro problema es la disminución de la tasa de transferencia de calor durante el proceso de solidificación con los pobres coeficientes de transmisión térmica de los PCM en estado sólido. Además estas cápsulas deben protegerse contra su destrucción durante el uso del edificio: no se puede taladrar, ni clavar en las paredes y techos donde estén presentes estas macrocápsulas.

#### 4.5.2.2. MICROENCAPSULADO

Microencapsulado es un proceso químico o físico que consiste en recubrir pequeñas partículas sólidas o líquidas de 1 a 1000 micrómetros diámetro con una cápsula sólida. Los procesos físicos que se utilizan para microencapsular son el pulverizado, centrifugado, en lecho fluido o recubrimiento como los cilindros de laminación.

Los procesos químicos describen encapsulados in situ como las complejas coacervaciones (separaciones de fases) con gelatina, policondensaciones interfaciales para obtener poliamidas o poliuretanos como las cápsulas, precipitaciones debidas a policondensación de amino resinas y otros. Los procesos in-situ tienen la capacidad de dotar a las microcápsulas con la mejor calidad en términos de difusión - firmeza de sus paredes.

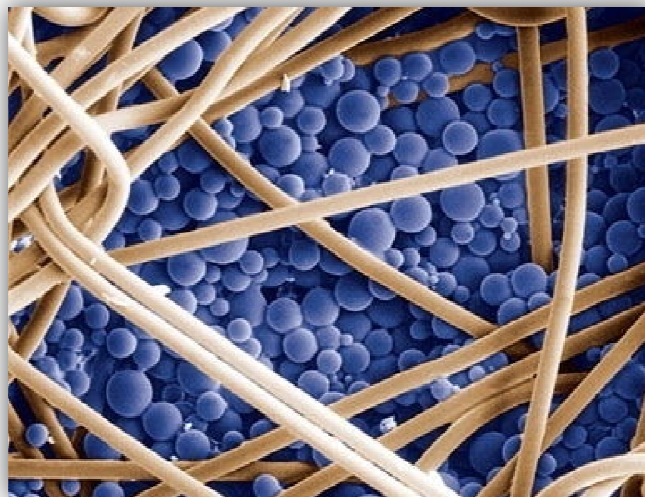


Figura 10: Microcápsulas de PCM en un tejido. (OUTLAST TECHNOLOGIES/SCIENCE PHOTO LIBRARY)

La película polimérica, de elevado peso molecular, debe ser compatible tanto con el PCM como con los materiales de construcción.

El PCM microencapsulado tiene la ventaja de ser de fácil aplicación, tener buena transmisión térmica debido al incremento de la superficie de intercambio y no necesita protección contra la destrucción. Sin embargo, puede afectar a la fuerza mecánica de la estructura.(Oliver Ramírez, Junio 2009).



### **4.5.3. EJEMPLO DE INCORPORACIÓN DE PCM EN LA CONSTRUCCIÓN. PROTOTIPO MAGIC BOX**

El proyecto 'Magic Box' de la Universidad Politécnica de Madrid ha participado en el concurso universitario Solar Decathlon 2005, organizado por el departamento de Energía de Estados Unidos que premia la mejor vivienda abastecida únicamente con energía solar (fotovoltaica y térmica). La 'Magic Box', único proyecto europeo que se ha presentado, es una casa bioclimática, construida con materiales cerámicos y reciclables, que utiliza el sol como única fuente de energía para producir electricidad y agua caliente, además es un buen ejemplo de uso de materiales de cambio de fase en el diseño de sistemas de acumulación de energía térmica para el acondicionamiento de la vivienda.

El objetivo era diseñar, construir y monitorizar en funcionamiento real de una casa autosuficiente. Durante el tiempo que la casa permaneció construida se monitorizó, obteniéndose datos muy favorables del comportamiento de las sustancias de cambio de fase durante ese periodo de tiempo.

Este prototipo de viviendas se desarrolló abarcando premisas de habitabilidad, sostenibilidad y control de contaminación, energía, recursos y materiales. El proyecto tenía como objeto fundamental la construcción de una vivienda autosuficiente en energía eléctrica, pero también bioclimática en más amplia definición, por lo que el acondicionamiento debía ser pasivo, calentándose el edificio con radiación solar y cargas internas y refrigerándose con ventilación nocturna. Por ello era imprescindible el uso de un sistema de acumulación eficaz que descargara la energía a temperatura constante y asegurara, de ese modo, permanentemente las condiciones de bienestar determinadas en las bases del concurso de 23°C. El material que se eligió fue una sustancia que cambia de estado a una temperatura controlada y en la que la energía que se acumula fuera la del calor latente de su cambio de fase.



Figura 11: Foto de la vivienda durante el periodo en el que estuvo construida en Washington. (Magic Box, 2005)

Los materiales de cambio de fase fueron depositados sobre el pavimento, debido al diseño de la casa, se quería aprovechar la energía solar que entraba por las ventanas y en verano el aire caliente se desplaza hacia el suelo como un ligero colchón sobre el pavimento.

La sustancia elegida para acumular la energía es un hidrocarburo en forma de parafina mezclada, que cambia de estado a  $23^{\circ}\text{C}$ . El calor latente de cambio de estado es de  $188 \text{ kJ/kg}$ . El sistema empleado basado en el cambio de fase de descarga siempre a  $23^{\circ}\text{C}$ , hasta que cambie de estado por completo, momento en el que se procedería a un intercambio sensible.

Este prototipo consta de un sistema de compuertas y sistemas de ventilación para ayudar a retornar al estado inicial del material de cambio de fase cuando ha realizado un ciclo. Pero además realizaron seguimiento de la temperatura interior sin usar el sistema de ventiladores. Este último seguimiento representa la vivienda del estudio ya que nuestro PCM funciona como un sistema pasivo puro, sin conductos de ventilación.

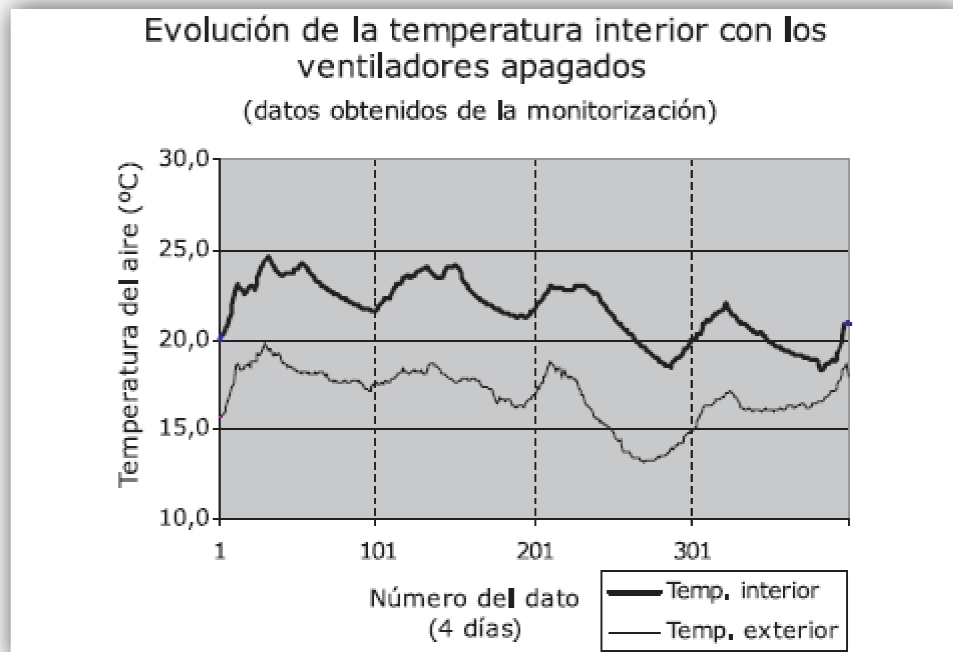


Figura 12: Evolución de la temperatura interior con los ventiladores apagados. (Magic Box, 2005)

En la Figura 12 se muestra un periodo de 4 días donde se mantuvieron los ventiladores apagados, de tal modo que el comportamiento fuera completamente pasivo y únicamente los PCM situados en el pavimento aportarán su masa térmica. El resultado, como se puede ver, es muy aceptable en las condiciones medias, aun sin emplear los ventiladores, ya que la temperatura máxima del periodo de cuatro días fue de 24,6 °C. En el peor de los días la Oscilación Media Diaria (OMD) fue sólo de 4,4 °C; a pesar de mantener apagados los ventiladores implica reducir a casi una tercera parte la demanda térmica. Todo ello demuestra la eficacia de estos PCM a la hora de aportar inercia térmica en un edificio.

## 4.6. CONCLUSIONES DE PCM

Este estudio se centra en la forma de almacenamiento térmico mediante calor latente (con PCM) ya que ofrecen una serie de ventajas respecto a los otros sistemas para su uso en edificación, como son:

- Su elevada densidad de almacenamiento energético (especialmente en estrechos rangos de temperatura) muy superior a la forma de calor sensible.

- Al no aumentar la temperatura con el almacenamiento energético, tampoco aumentan las pérdidas energéticas derivadas de ello que se mantienen en un nivel razonable durante el proceso de carga y descarga de energía.
- No requiere la ejecución de grandes instalaciones, ni el desarrollo de grandes infraestructuras para su aplicación en la edificación.
- La temperatura de trabajo necesaria (proceso de carga y descarga energética del material), se puede seleccionar dentro del rango de temperaturas utilizado en edificación (20-30°C). Se evitan así variaciones de temperatura fuera del rango de confort.
- Disminución de emisiones de equipos de climatización, por consiguiente una disminución en el efecto invernadero.
- Disminución del deterioro de la capa de ozono.
- Disminución del ruido.
- Disminución de costos de instalación y de explotación.
- Seguridad y sencillez de las instalaciones.
- Permite desfasar las cargas de la producción y aprovechar las tarifas eléctricas.

Las ventajas que la acumulación de calor con cambio de fase tiene en el aumento de la inercia térmica de las construcciones facilita el deseado grado de confort, permitiendo desfasar las puntas de demanda a las horas de menor costo de la electricidad y de mayor rendimiento de los sistemas mecánicos de producción de frío. Y también, se insistirá en el poder bajar muchísimo el consumo energético por el aprovechamiento masivo del frío gratis o 'free cooling' del aire necesario de renovación.

## 5. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

En este capítulo se detalla la ubicación de la vivienda y los datos climatológicos utilizados en las simulaciones, al igual que una descripción de la distribución de la planta de la vivienda junto con la justificación de la elección de dicha distribución.

### 5.1. UBICACIÓN

El solar sobre el que se ha realizado el estudio del comportamiento de la vivienda se encuentra en Leganés. Leganés es un municipio de la Comunidad de Madrid, limitado al sur con Fuenlabrada, al norte con los distritos madrileños de Carabanchel y Latina, al Oeste con Alcorcón, y al este con Villaverde y Getafe. A 11 km de Madrid centro.

Coordenadas	40°19'41"N 03°45'52"O
Altitud	665 m

Tabla 5: Posición del solar. (Elaboración propia)

La superficie del solar es de 300 m<sup>2</sup>. La topografía es horizontal. La forma de la parcela es rectangular siendo sus medidas, 20 m de largo por unos 15 m de ancho. Hay que subrayar que dicho solar es puramente ficticio.

### 5.2. DATOS CLIMATOLÓGICOS

En Leganés se da un clima mediterráneo continentalizado. Es decir, mediterráneo pero con temperaturas más extremas, típicas del continental, debido a lo alejado que se encuentra Leganés de la costa (la salida más cercana esta a más de 300 km en línea recta y está casi totalmente aislado de este por cadenas montañosas). Los inviernos son fríos, con olas de frío ocasionales en las que las mínimas descienden de 0 °C (heladas frecuentes). Por otra parte, los veranos son muy calurosos, siendo frecuente que las máximas superen los 35 °C y raramente los 40 °C. Las temperaturas mínima y máxima absolutas anuales pueden variar en casi 50 °C. La temperatura media anual es de unos 15 °C.

Las precipitaciones superan los 400 mm anuales, siendo los meses previos y posteriores al verano los más lluviosos. A que esto sea así contribuyen, en parte, las grandes trombas de agua que suelen ocurrir en esta época durante las

tormentas. En ocasiones éstas son muy espectaculares, con gran cantidad de aparato eléctrico y de precipitación (sea lluvia o más raramente granizo) aunque no suelen durar demasiados minutos. El propio verano es la época más seca, con sequías que provocan el estiaje de los arroyos y ciertas lagunas del municipio. Sin embargo, las épocas de sequía no son exclusivas del verano. Todos los años suele nevar, aunque el número de veces y la fuerza de estas sean muy variables.

Ocasionalmente se dan brumas y nieblas, sobre todo durante el invierno. Las rachas de viento fuerte (más de 50 km/h) se dan durante todo el año también de forma ocasional. Aparte de este fenómeno adverso, que puede provocar la caída de objetos como ramas de árboles a la vía pública, el principal riesgo natural que se da en la localidad son las olas de frío y sobre todo las de calor. Leganés tiene entre 2.500 y 3.000 horas de sol anuales.

Los datos climatológicos han sido facilitados por el departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid situado en Leganés, emplazamiento del estudio.

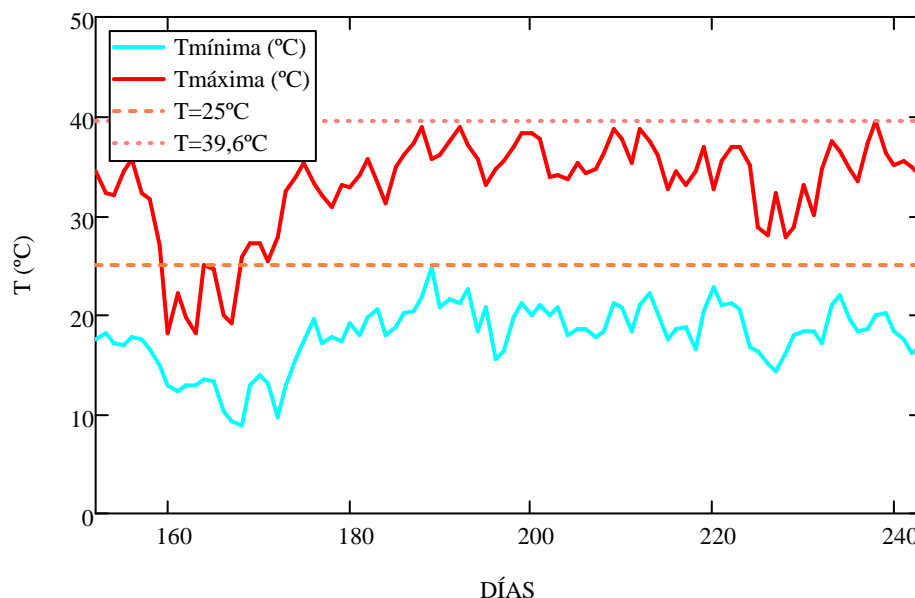


Figura 13: Temperaturas máximas y mínimas de Junio a Septiembre de 2010. (Elaboración propia)

### 5.3. DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA

La vivienda consta de 90 m<sup>2</sup> distribuidos en una única planta en la que se sitúan una cocina, un baño, salón- comedor, dos dormitorios y un vestíbulo.

Para el diseño de la vivienda, se han tenido en cuenta diversos factores para mejorar su eficiencia, los aspectos relevantes son la elección de la orientación y forma del diseño. Un edificio mal orientado y con una forma inadecuada puede necesitar más del doble de energía que uno similar bien diseñado y orientado.

La forma juega un papel esencial en las pérdidas de calor de un edificio. En líneas generales, se puede afirmar que las estructuras compactas y con formas redondeadas tienen menores pérdidas que las estructuras que tienen numerosos huecos, entrantes y salientes.

La orientación de los muros y ventanas de un edificio influyen decisivamente en las ganancias o pérdidas de calor de un edificio. En zonas frías interesa que los cerramientos de mayor superficie, los acristalamientos y las estancias o habitaciones de mayor uso estén orientadas al sur. Contrariamente, los acristalamientos y superficies orientadas hacia al norte deben ser lo más pequeños posibles. En zonas calurosas, interesa que haya la menor superficie acristalada en las orientaciones con más radiación solar (la orientación sur y la suroeste).

Para conseguir optimizar la iluminación natural se precisa una distribución adecuada de las estancias en las distintas orientaciones del edificio. El sol actúa sobre la cara sur de la vivienda, por lo tanto se ha decidido situar las habitaciones que se utilicen más durante el día en la fachada sur. Ésta es la parte más soleada, por lo que se aprovechará para obtener todo el calor pasivo posible. El sol que entra de esta forma sirve tanto para calefactar como para sanear el ambiente y reducir humedades. Esto se complementará con una buena masa térmica (incorporación de PCM) que almacene el calor que dejamos entrar en verano.

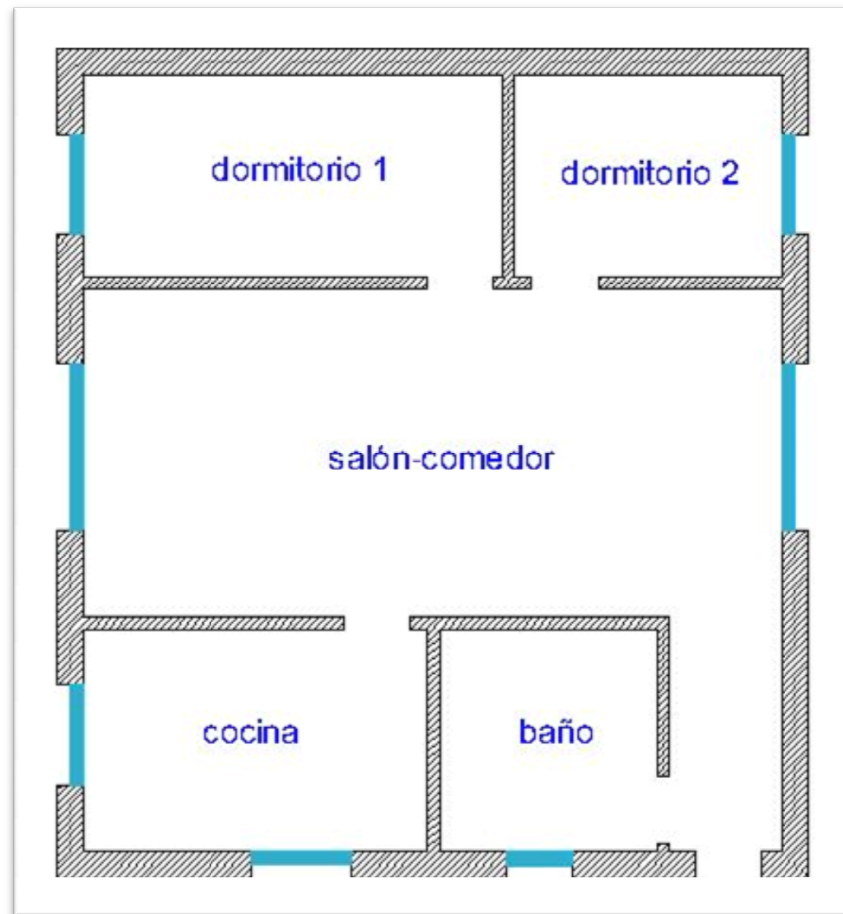


Figura 14: Plano vista planta de la vivienda. (Elaboración propia)

A continuación se muestra la Tabla 6 con las superficies correspondientes a cada dependencia de la vivienda. En el Anexo III se ha incluido un plano de la vivienda incluyendo las dimensiones cada una de las habitaciones.

TIPO DE DEPENDENCIA	SUPERFICIE [m <sup>2</sup> ]
SALÓN	36
COCINA	12
DORMITORIO 1	15
DORMITORIO 2	12
BAÑO	9
VESTÍBULO	6
<b>SUPERFICIE TOTAL</b>	<b>90</b>

Tabla 6: Superficies de cada dependencia. (Elaboración propia)



## 6. CARGAS TÉRMICAS

### 6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se calcula la carga térmica de la vivienda unifamiliar. Se ha de comenzar definiendo las condiciones de diseño, interior y exterior. A continuación se concretan la envolvente térmica del edificio y la clasificación de sus componentes. Por último, se procederá al cálculo de cargas térmicas de climatización.

La carga térmica se divide en dos componentes, carga térmica sensible y carga térmica latente. Se define carga térmica sensible como todo fenómeno que tiende a modificar la temperatura interior del local y carga térmica latente como aquella en la que se modifica la cantidad de vapor de agua contenido en el local.

Las cargas térmicas de climatización son las siguientes:

- Cargas térmicas sensibles exteriores:
  - Cargas térmicas de transmisión a través de paredes, suelos y techos.
  - Cargas térmicas de radiación a través de superficies acristaladas.
- Cargas térmicas sensibles interiores:
  - Cargas térmicas debidas a los ocupantes.
  - Cargas térmicas debidas a la iluminación.
  - Cargas térmicas debidas a la ventilación.
  - Carga térmica por infiltraciones.
  - Carga térmica debida a equipos.
- Cargas térmicas latentes interiores:
  - Cargas térmicas debidas a los ocupantes.

- Cargas térmicas debidas a la ventilación.
- Carga térmica por infiltraciones.

Una vez calculadas las cargas anteriores se procederá a la introducción y tratamiento de las cargas debidas a la incorporación de PCM en la vivienda. Donde se diferencian tres casos en función del estado del PCM, sólido, líquido o cambio de fase.

## 6.2. CONDICIONES DE DISEÑO

### 6.2.1. CONDICIONES DEL AMBIENTE TÉRMICO INTERIOR

Las condiciones interiores de diseño de la temperatura operativa y la humedad relativa se fijarán en base a la actividad metabólica de las personas, su grado de vestimenta y el porcentaje estimado de insatisfechos (PPD).

Los valores de la temperatura y humedad son las representadas en la Tabla 7 para las siguientes condiciones: personas con actividad metabólica sedentaria de 1,2 met, con grado de vestimenta de 0,5 clo en verano y 1 clo en invierno y un PPD entre el 10 y el 15%.

ESTACIÓN	TEMPERATURA OPERATIVA [°C]	HUMEDAD RELATIVA [%]
VERANO	23...25	45...60
INVIERNO	21...23	40...50

Tabla 7: Condiciones interiores de diseño. (Vivienda, Marzo 2006)

La velocidad media del aire en la zona ocupada se mantendrá dentro de los límites de bienestar, teniendo en cuenta la actividad de las personas y su vestimenta, así como la temperatura del aire y la intensidad de turbulencia.

Las condiciones de diseño se encuentran especificadas en el RITE. En el caso de climatización en verano, la temperatura de confort será igual a 25°C y la humedad relativa del interior de la vivienda será del 55%.

## 6.2.2. AMBIENTE EXTERIOR

Los datos para este cálculo pertenecen a los meses más calurosos del año, es decir, de Junio a Septiembre. El ambiente exterior de una localidad viene definido por la temperatura seca, la temperatura húmeda, la velocidad del viento y su dirección. También la radiación solar es una variable importante a estudiar. Hay que tener en cuenta que todas estas variables no son constantes en el tiempo. Los datos necesarios para definir el ambiente exterior de una instalación no son iguales para el invierno que para el verano, por ello se detallan las condiciones ambientales exteriores para el verano:

- Temperatura seca exterior.
- Temperatura húmeda exterior.
- Radiación solar.
- Temperatura del suelo.

Las temperaturas más desfavorables de cada mes del estudio con sus humedades relativas aparecen en la Tabla 8.

	TEMPERATURA MÁXIMA [°C]	HUMEDAD RELATIVA [%]
<b>JUNIO</b>	35,745	19,780
<b>JULIO</b>	38,872	13,606
<b>AGOSTO</b>	39,520	12,355
<b>SEPTIEMBRE</b>	35,346	17,441

Tabla 8: Temperaturas máximas y sus correspondientes humedades relativas. (Elaboración propia)

Es preciso estimar la carga térmica máxima de la vivienda tomando las condiciones más desfavorables de cada mes garantizándose así un diseño adecuado.

### 6.3. DEFINICIÓN DE LA ENVOLVENTE TÉRMICA DEL EDIFICIO Y CLASIFICACIÓN DE SUS COMPONENTES

La envolvente térmica del edificio está compuesta por todos los cerramientos que limitan espacios habitables con el ambiente exterior y por todas las particiones interiores que limitan los espacios habitables con los espacios no habitables que a su vez estén en contacto con el ambiente exterior.

Los cerramientos y particiones interiores de los espacios habitables se clasifican según su situación en las siguientes categorías:

- Cubiertas.
- Suelos.
- Fachadas.
- Medianerías.
- Cerramientos en contacto con el terreno.
- Particiones interiores.

La Figura 15 muestra la clasificación de las fachadas en función de la orientación.

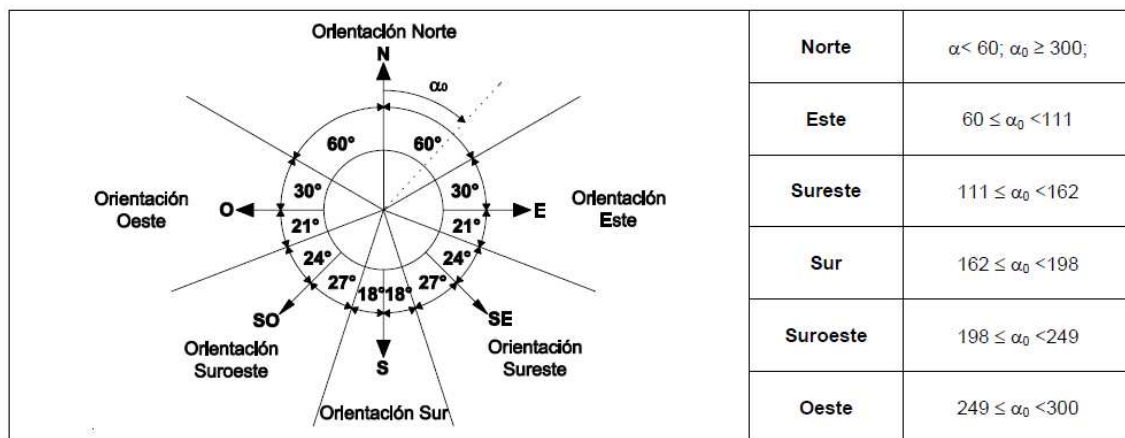


Figura 15: Orientaciones de las fachadas. (Vivienda, Marzo 2006)

## 6.4. CARGAS TÉRMICAS DE CLIMATIZACIÓN

Primero se realizará el cálculo de cargas térmicas sin tener en cuenta el estado del PCM, más adelante nos introduciremos más en profundidad en el problema de cambio de fase y su repercusión en la carga térmica.

### 6.4.1. CARGAS TÉRMICAS DE TRANSMISIÓN

Se trata de una carga sensible que se evalúa de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Q_{sen} = A \cdot U \cdot \Delta T$$

Ecuación 1

Donde:

- $Q_{sen}$  Carga por transmisión [W].
- $A$  Superficie del cerramiento [ $m^2$ ].
- $U$  Coeficiente de transmisión de calor [ $W/m^2\text{°C}$ ].
- $\Delta T$  Diferencia de temperatura entre la exterior y la de diseño [ $^{\circ}\text{C}$ ].

El coeficiente de transmisión de calor,  $U$ , para paredes y techos multicapa, se evalúa como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{capas} \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{\sum_{capas} Rt_i}$$

Ecuación 2

Donde:

- $e_i$  Espesor de la capa del material  $i$  [m].
- $\lambda_i$  Conductividad térmica de la capa  $i$  [ $W/m\text{°C}$ ].
- $h_i$  Coeficiente de convección interior [ $W/m^2\text{°C}$ ].
- $h_e$  Coeficiente de convección exterior [ $W/m^2\text{°C}$ ].
- $Rt_i$  Resistencia térmica de la capa  $i$  [ $m^2\text{°C}/W$ ].

Para el cálculo de este parámetro se hace uso del Código Técnico de Edificación y NBE-CT, 2.8, 2.8 en los cuales aparecen valores de coeficientes convectivos y conductividades térmicas de los diferentes materiales más empleados en la construcción.

## 6.4.1.1. PAREDES

### 6.4.1.1.1. EN CONTACTO CON EL EXTERIOR

Los valores de los coeficientes de convección interior y exterior se encuentran detallados en la Tabla 9, donde se dividen en forma de resistencias térmicas superficiales de acuerdo a la posición del cerramiento, dirección del flujo de calor y su situación en el edificio. Las resistencias térmicas superficiales exterior e interior correspondientes a las fachadas son 0,04 y 0,013 m<sup>2</sup>K/W respectivamente.

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor	Rse	Rsi
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal >60° y flujo horizontal	0,04	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal ≤60° y flujo ascendente	0,04	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente	0,04	0,17

Tabla 9: Resistencias térmicas superficiales de cerramiento en contacto con el aire exterior en m<sup>2</sup>K/W. (Ministerio)

La composición elegida para las fachadas se encuentra esquematizada en la Figura 16.

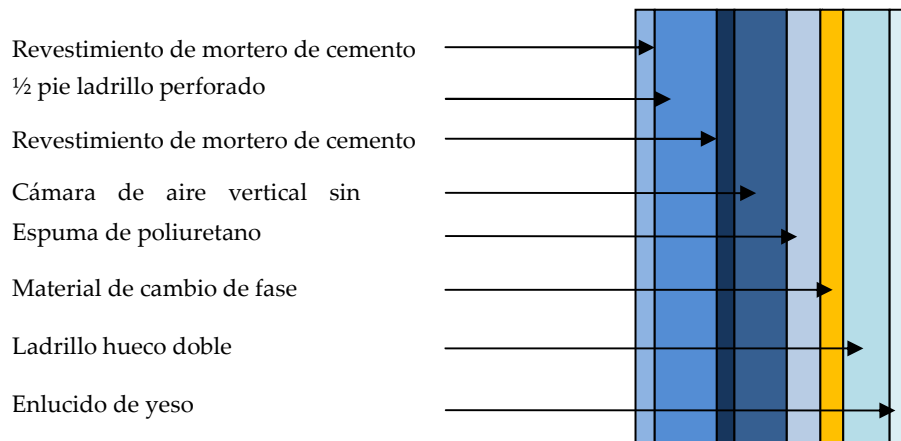


Figura 16: Esquema de la composición de la fachada. (Elaboración propia)

Los espesores y las conductividades térmicas correspondientes a cada elemento de la fachada pueden consultarse en la Tabla 10.

MATERIAL	e [m]	$\lambda$ [W/mK]
REVESTIMIENTO DE MORTERO DE CEMENTO	0,01	1,3
1/2 PIE LADRILLO PERFORADO	0,115	0,694
REVESTIMIENTO DE MORTERO DE CEMENTO	0,01	1,3
CÁMARA DE AIRE VERTICAL SIN VENTILAR	0,1	
ESPUMA DE POLIURETANO	0,04	0,05
MCF	0,014	0,6/0,59
LADRILLO HUECO DOBLE	0,07	0,444
ENLUCIDO DE YESO	0,02	0,4

Tabla 10: Composición del cerramiento exterior. (Elaboración propia)

La resistencia térmica de la cámara de aire vertical y sin ventilar se ha obtenido del Código Técnico de la Edificación y tiene un valor de 0,12 m<sup>2</sup>K/W.

El coeficiente de transmisión de calor de las paredes exteriores es de 0,636 W/m<sup>2</sup>K.

#### 6.4.1.1.2. EN CONTACTO CON EL INTERIOR

El procedimiento para las paredes interiores es el mismo aunque las condiciones cambian, es decir, las resistencias térmicas superficiales ahora, a ambos lados, se encuentran en contacto con el aire interior, cuyos valores se muestran a continuación.

$$R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Las conductividades térmicas y los espesores de cada capa de las paredes interiores:

MATERIAL	e [m]	$\lambda$ [W/mK]
MORTERO DE CEMENTO	0,02	1,4
LADRILLO PERFORADO	0,1	0,76
FIBRA DE VIDRIO (TIPO III)	0,05	0,033
LADRILLO HUECO	0,1	0,49
MORTERO DE CEMENTO	0,02	1,4
ENLUCIDO DE YESO	0,02	0,3

Tabla 11: Composición de las paredes interiores. (Elaboración propia)

El coeficiente de transmisión de las paredes interiores toma un valor de 0,453 W/m<sup>2</sup>K.

### 6.4.1.2. TECHO

El techo ha sido diseñado con una inclinación de 30% y su composición ha sido esquematizada en la Figura 17.

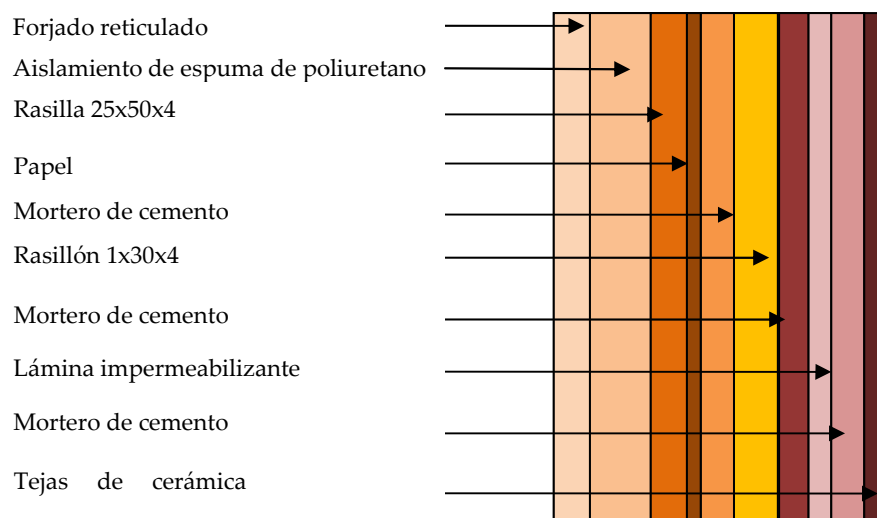


Figura 17: Esquema de la composición del techo. (Elaboración propia)

Los espesores y conductividades térmicas de cada uno de los componentes del techo se detallan en la Tabla 12.



MATERIAL	e [m]	$\lambda$ [W/mK]
FORJADO RETICULADO, VIGUETAS SEMIRRESISTENTES, BOVEDILLA CERÁMICA, NEGATIVO DE ACERO C-500 HORMIGÓN ARMADO HA-25/B/20/1A	0,3	2
AISLAMIENTO DE ESPUMA DE POLIURETANO	0,1	0,05
RASILLA 25x50x4	0,04	0,49
PAPEL	0,001	0,8
MORTERO DE CEMENTO	0,02	0,7
RASILLÓN 1x30x4	0,04	0,8
MORTERO DE CEMENTO	0,02	0,19
LÁMINA IMPERMEABILIZANTE	0,003	0,8
MORTERO DE CEMENTO	0,02	1,3
TEJAS TIPO ÁRABE DE CERÁMICA ROJA	0,02	0,05

Tabla 12: Composición del techo de interior a exterior. (Elaboración propia)

Las resistencias térmicas superficiales toman los siguientes valores:

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

$$R_{si} = 0,1 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

El coeficiente de transmisión resultante del techo es 0,394 W/m<sup>2</sup>K.

### 6.4.1.3. SUELOS

Como se trata de cerramientos horizontales con transferencia hacia particiones interiores, las resistencias térmicas superficiales son:

$$R_{se} = 0,17 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

$$R_{si} = 0,1 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

MATERIAL	e [m]	$\lambda$ [W/mK]
PLAQUETA O BALDOSA DE GRES	0,015	2,3
MORTERO DE CEMENTO	0,15	1,3
POLIESTIRENO (PS)	0,15	0,16
MORTERO DE CEMENTO	0,2	1,3
HORMIGÓN ARMADO	0,8	2,5

Tabla 13: Composición del suelo del interior a exterior. (Elaboración propia)

El coeficiente de transmisión a través del suelo es  $0,612 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

#### 6.4.1.4. PUERTAS

##### 6.4.1.4.1. EN CONTACTO CON EL EXTERIOR

El tipo de puerta elegido para el exterior es una puerta de madera con acristalamiento simple menor del 30%. Las resistencias térmicas superficiales son:

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$$

En la Tabla 14 se muestra el coeficiente de transmisión de la puerta.

MATERIAL	K [W/m <sup>2</sup> K]
PUERTA EXTERIOR: MADERA ACRISTALAMIENTO SIMPLE <30%	4

Tabla 14: Composición de la puerta. (Elaboración propia)

El coeficiente de transmisión toma el valor de  $2,381 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

##### 6.4.1.4.2. EN CONTACTO CON EL INTERIOR

Todas las puertas interiores son de madera opaca, por tanto su coeficiente global de transferencia de calor es de  $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### 6.4.1.5. SUPERFICIES ACRISTALADAS

Se consideran en este apartado las ventanas que pueden formar parte del cerramiento de la vivienda. No se da su resistencia térmica, pues estos elementos en si constituyen el propio cerramiento, por lo que añadiéndole la resistencia térmica superficial se obtiene su resistencia térmica total, es decir, el valor inverso de R.

El tipo de acristalamiento elegido para todas las ventanas de la vivienda es doble, 6 mm de espesor de la cámara de aire y carpintería en madera, donde le corresponde un coeficiente de transferencia térmica de 3,3 W/m²K.

### 6.4.2. CARGAS TÉRMICAS DEBIDAS A LA RADIACIÓN

En el periodo de estudio se ha de incluir el aporte de calor a través de las superficies acristaladas debido a la radiación solar. Cuyo valor se obtiene de la Ecuación 3.

$$Q_{radiación} [W] = I_T \cdot A_{cristal} \cdot \varphi$$

Ecuación 3

Donde:

- $I_T$  Radiación incidente por metro cuadrado, en función de la orientación [W/m²].
- $A_{cristal}$  Superficie acristalada [m²].
- $\varphi$  Factor de corrección [].

La radiación solar varía según la orientación de las superficies acristaladas, día y hora, y se pueden obtener de diversos recursos bibliográficos. En este caso se ha recurrido al manual de aire acondicionado de Carrier para el día 15 de Julio a las 15h solares, donde se han utilizado las mismas radiaciones para todo el periodo del estudio. Además se debe aplicar un factor de corrección de 0,9 sobre esa radiación al utilizan ventanas de vidrio doble en lugar de vidrio simple. La carga térmica debida a la radiación es 2526,84 W.

FACTOR DE CORRECCIÓN	
Vidrio doble	0,9
Elementos de sombra exteriores (persianas exteriores)	0,9
Elemento de sombra interiores	0,6

Tabla 15: Factor de corrección para superficies acristaladas. (Carrier, 1994)

### 6.4.3. CARGAS TÉRMICAS DEBIDAS A LA VENTILACIÓN

Para asegurar la calidad del aire interior es necesario prever una cierta renovación del aire.

El aire exterior introducido será compensado con el mismo caudal de aire extraído o expulsado por ventanas y puertas, con el fin de mantener la misma cantidad de aire seco en el interior del local.

La carga térmica de ventilación consta de dos componentes, una sensible y otra latente.

Carga sensible:

$$Q_{sensible} [W] = V_{vent} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{se} - T_{SL})$$

Ecuación 4

Donde:

- $V_{vent}$  Caudal de ventilación [ $m^3/s$ ].
- $\rho$  Densidad del aire [ $kg/m^3$ ].
- $c_p$  Calor específico del aire [ $J/kg^\circ C$ ].
- $T_{se}$  Temperatura seca del exterior [ $^\circ C$ ].
- $T_{SL}$  Temperatura seca del local [ $^\circ C$ ].

Carga latente:

$$Q_{latente} [W] = V_{vent} \cdot \rho \cdot h \cdot (W_{se} - W_{SL})$$

Ecuación 5

Donde:

- $V_{vent}$  Caudal de ventilación [ $m^3/s$ ].
- $\rho$  Densidad del aire [ $kg/m^3$ ].
- $h$  Calor latente de cambio de fase del agua [ $J/kg$ ].
- $W_{se}$  Relación de humedad del aire exterior [ $kg/kg$ ].
- $W_{SL}$  Relación de humedad del aire del local [ $kg/kg$ ].

Las cantidades de aire requeridas en ventilación vienen indicadas en el Código Técnico de la Edificación, en el correspondiente documento básico HS Salubridad (HS: Calidad del aire interior), además vienen reflejadas en la Tabla 16.

Los habitantes estimados para habitar la vivienda del estudio se obtienen de la Tabla 22 . Teniendo en cuenta que el número de ocupantes es 4, los valores de caudales en cada dependencia de la vivienda se muestran en la Tabla 16.

TIPO LOCAL	POR OCUPANTE	POR m <sup>2</sup> ÚTIL	POR LOCAL	CANTIDAD	SUPERFICIE ÚTIL [m <sup>2</sup> ]	CAUDAL MÍNIMO [l/s]
DORMITORIOS	5			2	27	40
SALAS DE ESTAR Y COMEDORES	3			1	36	12
ASEOS			15	1	9	15
COCINAS		2		1	12	24

Tabla 16: Caudal mínimo exigido de ventilación. (Vivienda, Marzo 2006)

$$V_{vent\ TOTAL} = 91\ l/s$$

Las temperaturas utilizadas para el cálculo de la carga sensible de ventilación son las medias de las temperaturas máximas de los meses de Junio a Septiembre de 2010.

MES DEL AÑO	TEMPERATURA MÁXIMA EXTERIOR [°C]
JUNIO	31,66
JULIO	38,07
AGOSTO	36,35
SEPTIEMBRE	31,25

Tabla 17: Temperaturas máximas por meses. (Elaboración propia)

Los resultados se muestran en la Tabla 18 aplicando la Ecuación 4.

MES DEL AÑO	CAUDAL [m <sup>3</sup> /s]	q [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/kg°C]	Tint [°C]	Tex [°C]	FACTOR SIMULTANEIDAD	Q <sub>sensible</sub> [W]
JUNIO	0,091	1,2	1005	25	31,66	0,75	548,18
JULIO	0,091	1,2	1005	25	38,07	0,75	1075,78
AGOSTO	0,091	1,2	1005	25	36,35	0,75	934,21
SEPTIEMBRE	0,091	1,2	1005	25	31,25	0,75	514,43

Tabla 18: Cálculo de calor sensible debido a ventilaciones. (Elaboración propia)

Para el cálculo de la carga térmica latente de ventilación es necesario el uso del diagrama psicrométrico para obtener las humedades correspondientes a las condiciones del aire del interior y exterior en los días elegidos. Se ha utilizado Psicro, un programa que ofrece los datos necesarios para dicho cálculo, además adaptado a la altura sobre el nivel del mar, que en este caso son 665 m.

MES DEL AÑO	TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA EXTERIOR [°C]	HUMEDAD RELATIVA [%]	HUMEDAD ESPECÍFICA [g/g]	ENTALPÍA [kJ/kg]
JUNIO	31,66	17,5	0,00549	45,74
JULIO	38,07	12,3	0,00547	52,2
AGOSTO	36,35	11,9	0,00483	48,77
SEPTIEMBRE	31,25	17,4	0,00532	44,88

Tabla 19: Datos obtenidos con Psicro. (Elaboración propia)

Los datos en el interior:

	TEMPERATURA INTERIOR [°C]	HUMEDAD RELATIVA [%]	HUMEDAD ESPECÍFICA [g/g]	ENTALPÍA [kJ/kg]
INTERIOR	25	55	0,01113	52,32

Tabla 20: Datos en el interior de la vivienda. (Elaboración propia)

Los resultados obtenidos son:

AIRE EXTERIOR	Q[W]
JUNIO	1491,60
JULIO	1496,91
AGOSTO	1666,26
SEPTIEMBRE	1536,69

Tabla 21: Cargas térmicas latentes debidas a la ventilación. (Elaboración propia)

#### 6.4.4. CARGA TÉRMICA POR INFILTRACIONES

Es probablemente la carga más difícil de estimar porque es altamente subjetiva. Se compone al igual que las cargas debidas a la ventilación por una parte latente y otra sensible, que dependen ambas del volumen total de aire infiltrado. Al ser un dato difícil de estimar, se calcula como un 5% de la carga total de la vivienda.

Las cargas térmicas interiores, principalmente, son debidas a los ocupantes de la vivienda, iluminación y equipos.

#### 6.4.5. CARGAS TÉRMICAS DEBIDAS A LOS OCUPANTES

Los ocupantes aportan carga sensible y latente, en función de la actividad que estén desarrollando. Los valores estimados típicos de la carga disipada por una persona (en reposo) son:

$$Q_{sensible/persona}[W] = 70W$$

$$Q_{latente/persona}[W] = 60W$$

La carga total aportada será el producto del número de personas en el local por el calor disipado por cada persona. Además se aplicará un factor de simultaneidad de 0,75.

$$Q_{sensible\ ocupantes}[W] = \text{número de personas} \cdot Q_{sensible/persona} \cdot 0,75$$

Ecuación 6

$$Q_{latente\ ocupantes}[W] = \text{número de personas} \cdot Q_{latente/persona} \cdot 0,75$$

Ecuación 7

Los habitantes estimados para habitar la vivienda del estudio se obtienen de la Tabla 22 .

Nº DORMITORIOS	1	2	3	4	5	6	7	más de 7
Nº de personas	1,5	3	4	6	7	8	9	Nº de dormitorios

Tabla 22: Número mínimo de personas en función del número de dormitorios. (Ministerio)

De acuerdo con la Tabla 22, la vivienda de dos dormitorios debe ser habitada por un mínimo de 3 personas. Para los próximos cálculos se ha elegido 4 ocupantes para situarnos en peores condiciones.

Las cargas térmicas resultantes son:

CARGAS TÉRMICAS	Q[W]
Sensible	270
Latente	180

Tabla 23: Cargas térmicas debidas a los ocupantes. (Elaboración propia)

#### 6.4.6. CARGAS TÉRMICAS DEBIDAS A LA ILUMINACIÓN

En el diseño de la vivienda se ha determinado utilizar bombillas de bajo consumo, lo cual supone un notable ahorro de energía, ya que consumen un 80% menos que las convencionales y duran entre 6 y 8 veces más. Con las bombillas de bajo consumo reducimos el consumo eléctrico y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

BOMBILLA INCANDESCENTE [W]	BOMBILLA DE BAJO CONSUMO CON IGUAL INTENSIDAD DE LUZ [W]	COSTE ELECTRICIDAD [€]
40	9	42
60	11	67
75	15	82
100	20	109

Tabla 24: Comparativa de consumos de bombillas incandescentes con bombillas de bajo consumo. (IDAE, 2007)

Frente a las tradicionales bombillas incandescentes, las de nueva tecnología de bajo consumo tienen muchísimas ventajas:

- Son más eficientes. Reducen en un 80% la energía consumida por las tradicionales bombillas incandescentes.
- Son más económicas. Duran, como mínimo, 6 veces más que una bombilla tradicional y su coste se recupera en menos de 1 año.
- Son más ecológicas. Reducen sustancialmente las emisiones de CO<sub>2</sub>, que son nocivas para el medio ambiente.

La Tabla 25 muestra el número de bombillas en cada una de las habitaciones de la vivienda.



HABITACIÓN	NÚMERO DE BOMBILLAS
SALÓN	8
COCINA	4
DORMITORIO1	4
DORMITORIO2	4
BAÑO	3
VESTÍBULO	3
<b>TOTAL</b>	<b>26</b>

Tabla 25: Número de bombillas por habitación. (Elaboración propia)

En función de la localización de cada bombilla se recurre a una determinada potencia. A continuación se especifican el número de bombillas con su correspondiente potencia.

POTENCIA BOMBILLA BAJO CONSUMO [W]	NÚMERO DE BOMBILLAS
9	3
11	2
15	6
20	15

Tabla 26: Número de bombillas en función de su potencia. (Elaboración propia)

El calor desprendido por las luces es todo calor sensible, pero una parte es carga por radiación y otra lo es por convección, dependiendo del tipo de iluminación, por lo que nuevamente la carga instantánea de refrigeración deberá tener en cuenta el efecto del almacenamiento, si se pretende evaluar con precisión su carga total.

La carga debida a la iluminación obtenida es de 720 W correspondiendo a 8 W/m<sup>2</sup>.

#### **6.4.7. CARGAS TÉRMICAS DEBIDAS A EQUIPOS**

Todo aparato eléctrico de la vivienda disipa calor al ambiente afectando a la carga total interior de la vivienda. A continuación se muestra una tabla con electrodomésticos típicos de una vivienda unifamiliar con sus respectivas potencias y factores de uso horario (Alonso, 2011).

EQUIPOS	POTENCIA [W]	FACTOR DE USO HORARIO	Q [W]
PLANCHA	1200	0,036	42,9
ASPIRADORA	1200	0,024	28,6
TV	150	0,250	37,5
CAFETERA	700	0,042	29,2
HORNO MICROONDAS	1200	0,010	12,5
ORDENADOR	150	0,167	25,0
AIRE ACONDICIONADO	2950	0,333	983,3
LAVADORA	3000	0,048	142,9
HORNO ELÉCTRICO	3500	0,010	36,5
VENTILADOR	100	0,333	33,3
FRIGORÍFICO	200	0,375	75,0
LAVAVAJILLAS	2300	0,060	136,9
PEQUEÑOS ELECTRODOMÉSTICOS	1000	0,042	41,7
VITROCERÁMICA	3000	0,083	250,0
SECADORA	3000	0,048	142,9

Tabla 27: Consumo medio de equipos de una vivienda unifamiliar. (Elaboración propia)

La carga total debida a los equipos dentro de la vivienda asciende a 2018 W.

## 6.5. CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS CON PCM

El cálculo de cargas térmicas de la vivienda incluyendo materiales de cambio de fase requiere un trato especial, ya que su estado varía a lo largo del periodo de cálculo.

### 6.5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS

El principal problema que supone el uso de materiales de cambio de fase reside en el cálculo de cargas. Esto es debido a la variación de su estado durante el día: el material puede encontrarse en estado sólido, líquido o cambiando de fase, dependiendo de las condiciones exteriores, interiores y otros muchos factores.

Se distinguen 3 casos: estado sólido, líquido y cambio de fase, a continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos.

### CASO I: SÓLIDO

El material de cambio de fase se encuentra en estado sólido. Esto ocurrirá cuando las temperaturas exteriores sean bajas y no consigan subir la temperatura del material de cambio de fase hasta la temperatura de fusión. Normalmente esta fase ocurre a primeras horas de la mañana, cuando el material haya conseguido disipar durante toda la noche el calor absorbido del día anterior. Multitud de diseños para la inserción de PCM en viviendas proponen el uso de conductos de ventilación situados en contacto con los PCM para facilitar la disipación del calor almacenado durante los días de verano y expulsar ese aire caliente al exterior, evitando así que la casa recupere el calor almacenado durante el día. Sin embargo, las simulaciones han sido realizadas sin la presencia de dichos conductos, los resultados son los obtenidos usando materiales de cambio de fase como sistemas pasivos, sin la necesidad de ningún elemento auxiliar para facilitar sus transiciones de líquido a sólido o viceversa. En este caso, el cálculo de cargas se realiza siguiendo los pasos del Capítulo 6, teniendo en cuenta que el PCM se comporta igual que otro elemento constructivo al encontrarse en estado sólido.

### CASO II: LÍQUIDO

El material de cambio de fase en estado líquido. Los cálculos para el caso I son válidos para esta situación, teniendo en cuenta que la resistencia térmica del PCM varía según el estado en el que se encuentre, sólido o líquido. Dependiendo del PCM elegido, la resistencia térmica varía respecto a la correspondiente a la de estado sólido.

Por ejemplo, si elegimos un PCM de la Tabla 2 cuyas conductividades térmicas en estado líquido y sólido son 0,232 W/m·K y 0,464 W/m·K respectivamente. Las resistencias térmicas para un espesor de 2 cm son las mostradas a continuación.

$$Rt_{MCFsólido} = \frac{e_{PCM}}{\lambda_{PCM sólido}} = \frac{0,02 \text{ m}}{0,464 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,043 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$
$$Rt_{MCFlíquido} = \frac{e_{PCM}}{\lambda_{PCM líquido}} = \frac{0,02 \text{ m}}{0,232 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,086 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Ecuación 8

Donde:

$e_{PCM}$	Espesor de la capa de PCM [m].
$\lambda_{PCM}$	Conductividad térmica de la capa de PCM [W/mK].
$Rt_{PCM}$	Resistencia térmica de la capa de PCM [m <sup>2</sup> K/W].

Teniendo en cuenta que la conductividad térmica correspondiente al estado líquido es casi la mitad de la conductividad térmica del estado sólido, se observa que al calcular las resistencias térmicas, siendo éstas inversamente proporcionales a la conductividad térmica, se obtiene que las relaciones se invierten. Es decir, en estado líquido se duplica el valor de la resistencia del estado sólido. Hay que señalar que la repercusión de este cambio no será muy significativa ya que la contribución de los demás elementos de la vivienda no cambia y además como se verá en capítulos posteriores, el espesor de PCM necesario será del orden de centímetros, dando lugar a una resistencia térmica muy baja comparada con los demás elementos del cerramiento. Para comprobar que su influencia es escasa se han calculado los coeficientes de transmisión resultantes para un muro con las mismas características que las fachadas de la vivienda. Se muestran en la Tabla 28 los coeficientes obtenidos y se puede observar que existe una diferencia menor del 3 %.

U PCM sólido [W/m <sup>2</sup> K]	0,628
U PCM líquido [W/m <sup>2</sup> K]	0,612

Tabla 28: Valores de U. (Elaboración propia)

Los valores obtenidos de la Tabla 28 han sido obtenidos a partir de los datos de la Tabla 10 utilizando el PCM del ejemplo con un espesor de 2 cm y aplicando la Ecuación 2.

### CASO III: CAMBIO DE FASE

El PCM se encuentra en estado de cambio de fase. Este caso es el más complejo de los tres analizados, ya que el calor del exterior no podrá traspasar las paredes hasta llegar al interior de la vivienda, sino que será almacenado en forma de calor latente consiguiendo una disminución significativa de carga térmica resultante. Para simplificarlo se han establecido las siguientes condiciones:

- El material se encuentra durante todo el tiempo de cambio de fase homogéneo. Es decir no coexisten fases al mismo tiempo.

- Temperatura constante durante el cambio de fase.
- Todas las zonas con PCM comienzan a cambiar de fase a la vez.
- Densidad constante durante el cambio de fase.
- No existe efecto de absorción de parte de la radiación transmitida a través del vidrio en suelos, paredes y muebles existentes en la vivienda.
- El PCM vuelve al estado inicial una vez iniciado un nuevo ciclo (24h). Se impone la liberación del calor almacenado durante la noche.

Otro dato a destacar sobre el sistema de almacenamiento de calor latente es que descarga la energía a temperatura constante, mientras que el sistema de almacenamiento de calor sensible descarga la energía a temperatura variable a medida que se va enfriando o calentando.

Para determinar las ventajas que supone el almacenamiento de calor latente frente al sensible, el primer paso que hay que tomar es comparar la energía térmica que es capaz de almacenar el PCM frente la energía sensible que acumula un muro convencional. Para ello se utilizan la Ecuación 9 y Ecuación 10.

$$Q_{latente}[\text{MJ}] = h_f \cdot \rho_{PCM} \cdot V_{PCM}$$

Ecuación 9

Donde:

- $h_f$  Calor latente de cambio de fase [MJ/kg].  
 $\rho_{PCM}$  Densidad del PCM [kg/ m<sup>3</sup>].  
 $V_{PCM}$  Volumen de PCM [m<sup>3</sup>].

$$Q_{sensible}[\text{MJ}] = C_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T$$

Ecuación 10

Donde:

- $C_p$  Calor específico [kJ/kgK].  
 $\rho$  Densidad [kg/ m<sup>3</sup>].  
 $V$  Volumen [m<sup>3</sup>].  
 $\Delta T$  Incremento de temperatura [K]

Acumular energía aprovechando el calor latente de cambio de estado supone almacenar 6 veces más energía que acumular en forma de calor sensible en un muro de ladrillo macizo al que hemos logrado incrementar su temperatura en 20°C. El calor específico del ladrillo es 0,84 kJ/kg·K y su densidad 1800 kg/m³, por lo que la energía acumulada en un metro cúbico es solo de 30,24 MJ. En cambio un PCM con densidad de 1400 kg/m³ y calor latente de 180 kJ/kg puede llegar a acumular alrededor de 250 MJ en un metro cúbico.

Una vez conocida la cantidad de calor capaz de absorber el PCM instalado en la vivienda, es necesario determinar en qué momento el PCM comienza a almacenar energía latente. Esto ocurre cuando el PCM alcanza la temperatura de fusión. Para ello, es necesario determinar su temperatura a lo largo de todo el periodo analizado. Se ha utilizado la analogía entre la resolución de circuitos eléctricos y térmicos para representar gráficamente en la Figura 18 el método utilizado para la obtención de la temperatura del PCM.

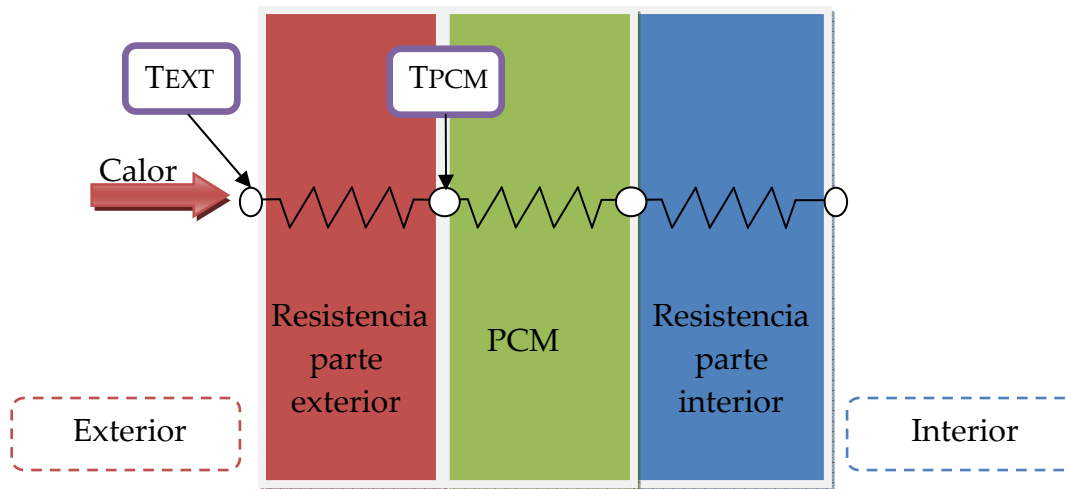


Figura 18: Esquema de resistencias del muro. (Elaboración propia)

Se ha utilizado la Ecuación 11 para determinar la temperatura del material de cambio de fase.

$$Q_{muro}[W] = U_{mem} \cdot A \cdot (T_{ext} - T_{PCM})$$

Ecuación 11

Donde:

$U_{mem}$  Coeficiente de transferencia de la mitad exterior del muro [W/m²·°C].

$A$  Superficie del muro [m²].

$T_{ext}$  Temperatura exterior [°C].

$T_{PCM}$  Temperatura del PCM [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Despejando la temperatura incógnita de la Ecuación 11 se obtiene:

$$T_{PCM}[^{\circ}\text{C}] = T_{ext} - \frac{Q_{muro}}{U_{mem} \cdot A}$$

Ecuación 12

### SIMULACIÓN DE UN MURO UNITARIO (1m<sup>2</sup>)

Una forma de introducir y explicar los casos descritos anteriormente es a través de una simulación del comportamiento de un muro sometido a una diferencia de temperatura variable durante un periodo de 24 horas.

Para realizar esta simulación se ha supuesto un muro con las mismas características que la vivienda que será analizada en futuros capítulos con un área de un metro cuadrado. Su composición es la mostrada en la Tabla 29.

MATERIAL	e [m]	$\lambda_{sól/líq}$ [W/mK]
REVESTIMIENTO DE MORTERO DE CEMENTO	0,01	1,3
1/2 PIE LADRILLO PERFORADO	0,115	0,694
REVESTIMIENTO DE MORTERO DE CEMENTO	0,01	1,3
CÁMARA DE AIRE VERTICAL SIN VENTILAR	0,1	
ESPUMA DE POLIURETANO	0,04	0,05
PCM	0,002	0,464/0,232
LADRILLO HUECO DOBLE	0,07	0,444
ENLUCIDO DE YESO	0,02	0,4

Tabla 29: Composición y propiedades del muro. (Elaboración propia)

Las resistencias térmicas superficiales para el interior y exterior son:

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$$

La resistencia térmica de la cámara de aire vertical y sin ventilar se ha obtenido del Código Técnico de la Edificación y tiene un valor de  $0,12 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Los coeficientes de transmisión  $U$  obtenidos teniendo en cuenta todos los datos anteriores se muestran en la Tabla 30.

Estado	SÓLIDO	LÍQUIDO	CAMBIO DE FASE
$U \text{ [W/m}^2\text{°C]}$	0,628	0,612	4,038

Tabla 30: Coeficiente global de transmisión de calor. (Elaboración propia)

Previamente a la simulación del comportamiento térmico de dicho muro, se procede a la esquematización del comportamiento de la carga térmica durante un ciclo de 24 horas donde se puede diferenciar los tres casos descritos anteriormente que coinciden con los estados sólido, líquido y cambio de fase.

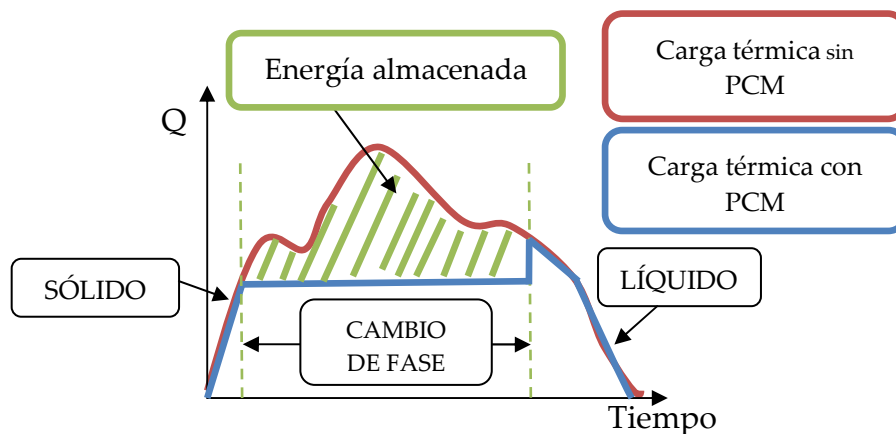


Figura 19: Esquema del comportamiento de la carga térmica en un ciclo de fusión del PCM. (Elaboración propia)

En el comienzo del ciclo el PCM se encontrará en estado sólido. Durante las primeras horas la temperatura exterior comenzará a subir y con ella la carga térmica, mientras eso ocurre, el sistema se comportará como un sistema de almacenamiento sensible. A medida que la temperatura sube, la temperatura del PCM se acercará a la temperatura de fusión, dando inicio al cambio de fase cuando la temperatura del PCM alcance la temperatura de fusión. Desde ese momento, el calor que entra del exterior hasta el PCM será almacenado hasta que iguale al calor latente. Mientras este almacenamiento ocurre, la temperatura del PCM permanecerá constante y el calor que penetrará al interior de la vivienda será el inducido por la diferencia de temperatura entre  $T_f$  y la temperatura interior, que será constante al ser esa diferencia de temperatura constante. Una vez alcanzado el límite de almacenamiento, el material de



cambio de fase pasará a estado líquido y permanecerá en ese estado hasta que la temperatura del PCM baje hasta la temperatura de fusión repitiendo el ciclo anterior en sentido inverso.

La capacidad de almacenamiento de un PCM es muy alta. En este caso, la cantidad de energía capaz de almacenar es la calculada con la Ecuación 9. En la Figura 20 se muestra la cantidad de energía capaz de acumular el PCM del ejemplo en función de la masa. Un solo kilo del PCM elegido es capaz de almacenar 180 kJ.

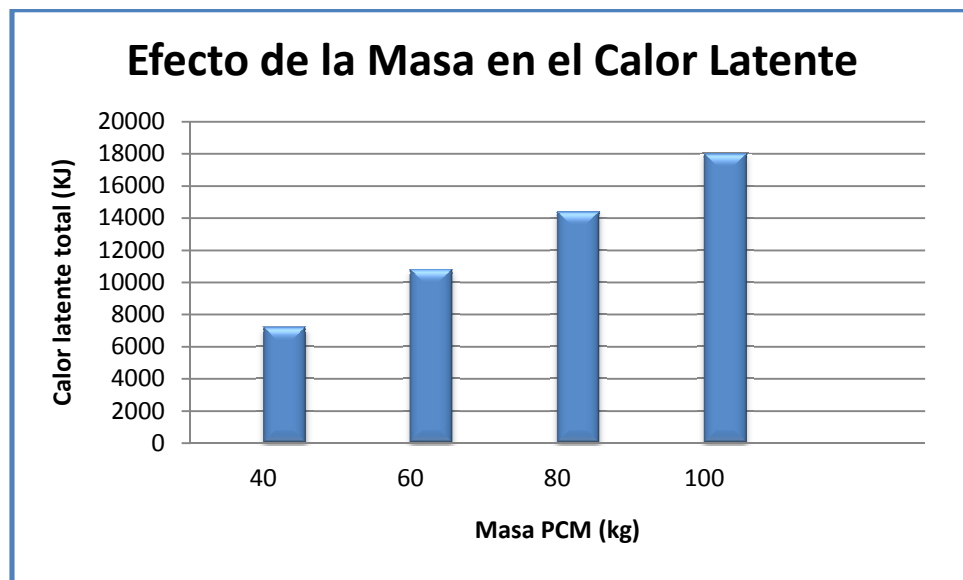


Figura 20: Efecto del incremento de la masa de PCM. (Elaboración propia)

A continuación se muestra en la Figura 21, una simulación durante el día 26 de Junio de 2010 comparando el muro del ejemplo utilizando 2 kg de PCM en su interior, que corresponde a una capacidad de almacenamiento de 360 kJ.

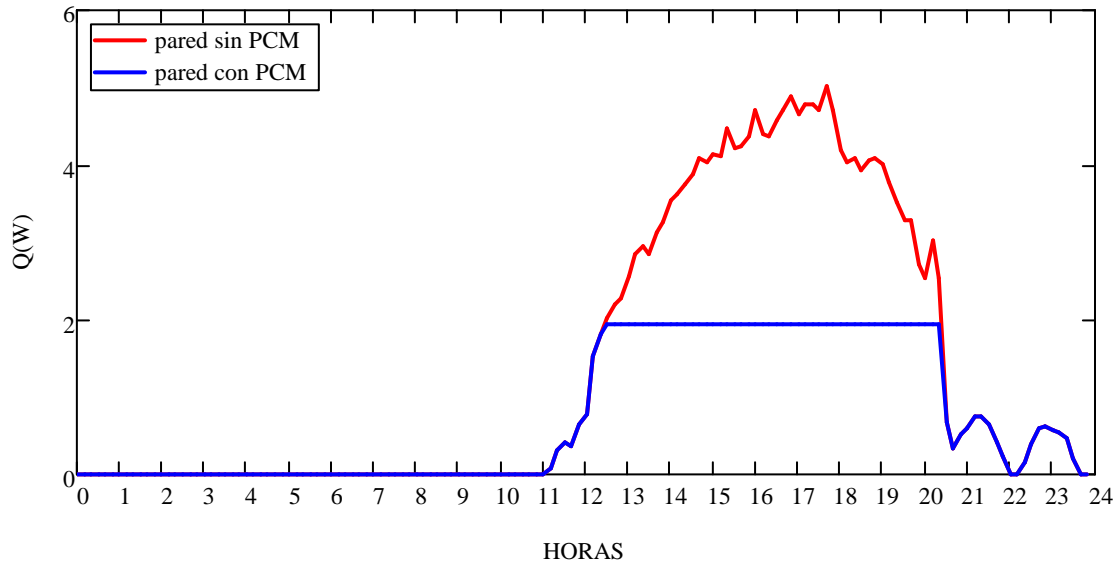


Figura 21: Carga térmica durante el día 26 de Junio de 2010. (Elaboración propia)

Como ya se ha explicado, en el caso del muro con PCM se observa como la carga térmica se mantiene constante durante los valores más altos del día, consiguiendo así una mejoría en confort térmico y menor consumo de los equipos de climatización. En este caso, el PCM no ha alcanzado el estado líquido, esto se ha determinado al comparar la cantidad almacenada que corresponde a 54 kJ con el calor latente correspondiente a los 2 kg de PCM.

En la Figura 22 se muestra el proceso de almacenamiento de calor al producirse el cambio de fase en el PCM en el interior del muro. Se puede observar como la temperatura exterior varía con el tiempo provocando la variación del calor que entra a través del muro. Al traspasar el muro dicho calor se encuentra con el PCM cambiando de fase, el cual, para mantener la temperatura constante y alcanzar la fase de líquido comienza a almacenar calor. De esta forma, el calor que penetra al interior de la casa es el producido por la diferencia de temperatura constante entre la temperatura de fusión y la temperatura de confort interior.

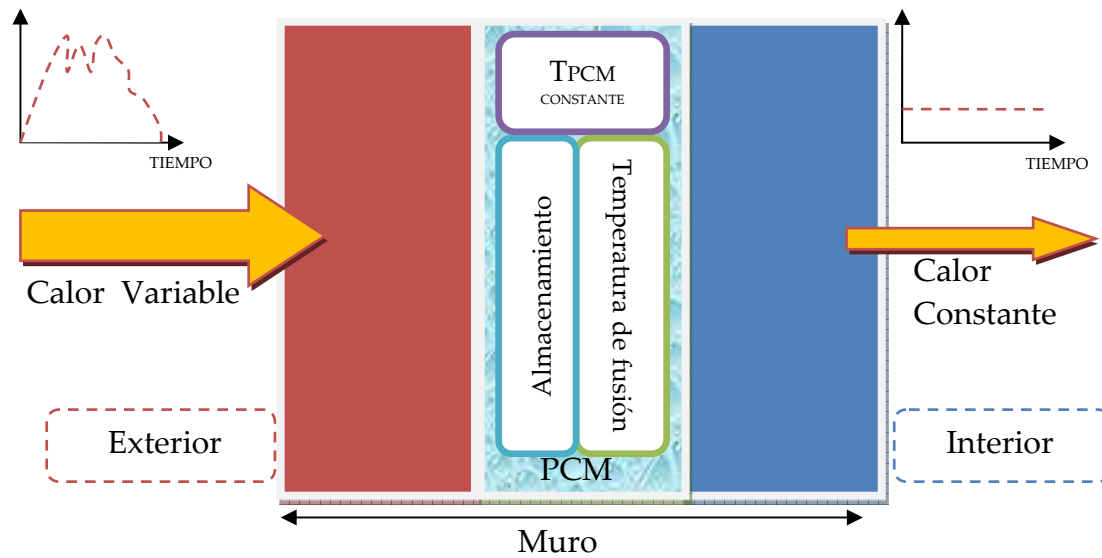


Figura 22: Esquema del proceso de cambio de fase del PCM del muro unitario. (Elaboración propia)

Es tal la capacidad de absorción de este muro que con solo 2 kg de PCM repartidos por toda la superficie con un espesor de apenas dos milímetros, se consiguen amortiguar las condiciones externas de una forma muy significativa. En este caso el PCM, utilizando la Ecuación 9, tiene una capacidad de almacenamiento de 360 kJ. Todavía tiene capacidad de almacenar más de 300kJ.

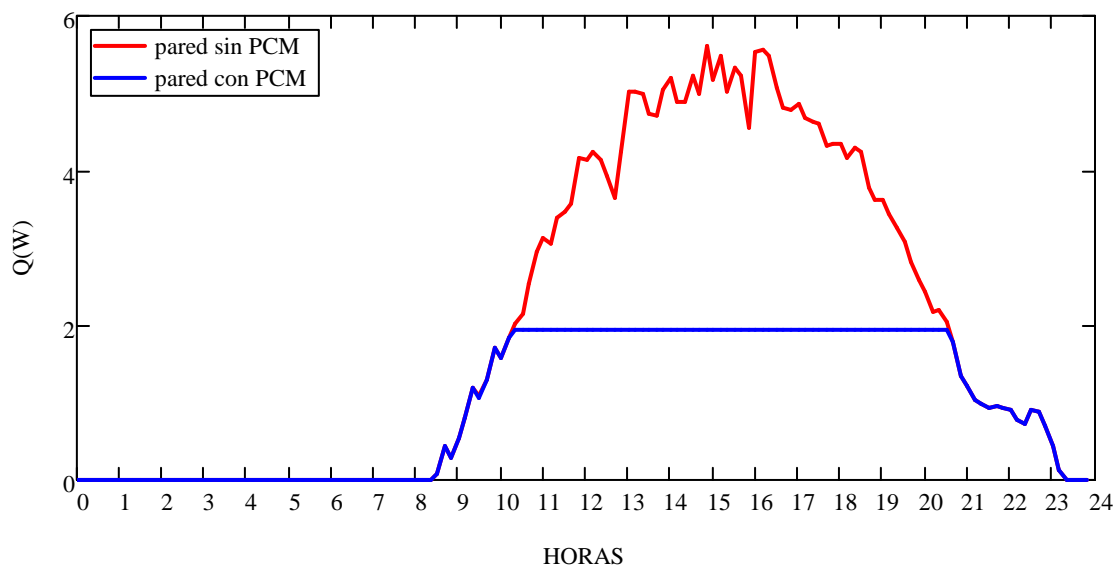


Figura 23: Carga térmica del día 6 de Junio de 2010. (Elaboración propia)

Para el día 6 de Junio se muestra la simulación en la Figura 23. Donde la cantidad absorbida por el PCM alcanza los 79,8 kJ, caso en el cual tampoco se ha conseguido alcanzar el estado líquido. Mientras que en la Figura 24, se ha

realizado una simulación el día con temperaturas más elevadas y aún así, la cantidad absorbida de 296 kJ no alcanza a superar el calor latente del PCM.

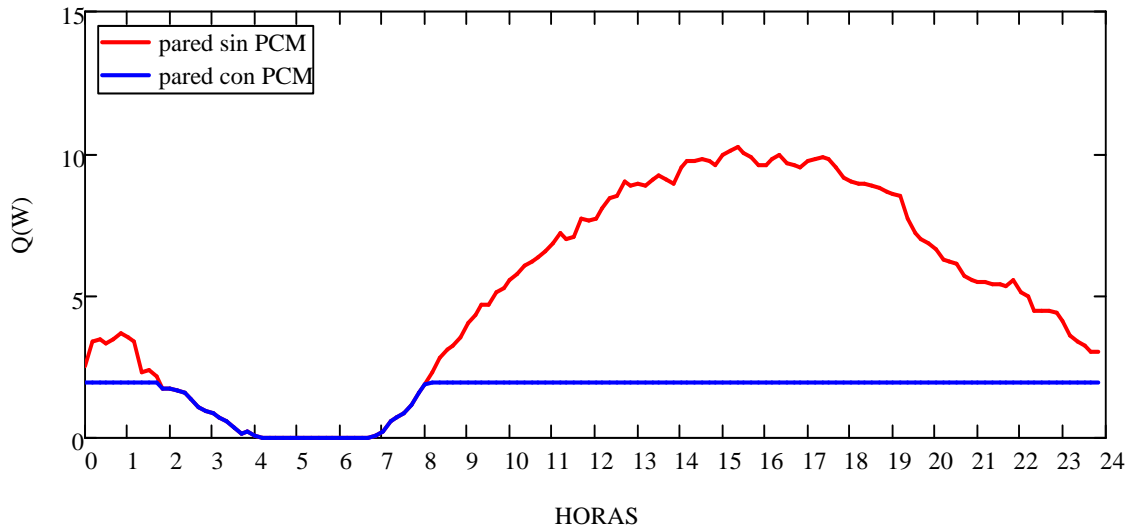


Figura 24: Carga térmica del día 6 de Julio de 2010. (Elaboración propia)

Para observar un día en el que el PCM cambie de estado, se ha disminuido la cantidad a un 1 kg. A continuación en la Figura 25 se muestra el comportamiento cuando se alcanza el estado líquido.

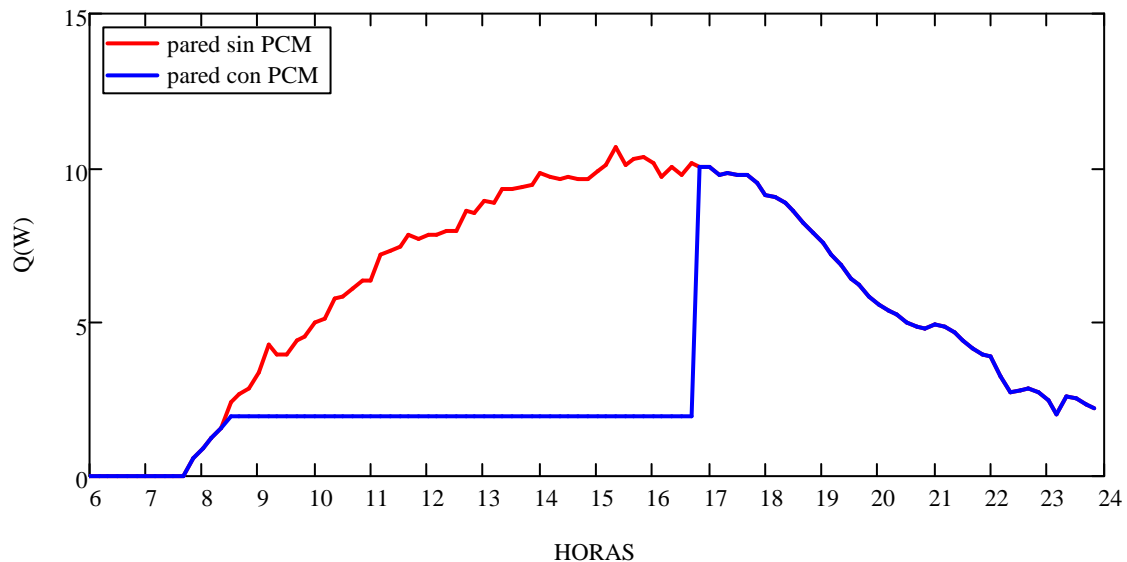


Figura 25: Demanda térmica durante el día 9 de Agosto de 2010. (Elaboración propia)

En la Figura 25 se observa como el muro comienza a absorber energía cuando ha alcanzado la temperatura de fusión del PCM. Esta tendencia se mantiene hasta que logra almacenar un total de 180 kJ que corresponden al calor latente para la cantidad de 1 kg. Una vez en estado líquido, su comportamiento es



similar al caso sin PCM, pero aun así sigue reduciendo la carga térmica aunque no se llegue a apreciar en la figura, ya que la conductividad térmica del líquido es menor que la del estado sólido. Aún así, siempre se tiende a mantener el PCM durante el mayor tiempo posible en estado de fusión para conseguir una mayor reducción de carga. En los siguientes apartados, la condición de mantener el PCM lejos de alcanzar el estado líquido será el criterio para calcular la cantidad de PCM necesaria.



**ANÁLISIS TÉRMICO DE LA  
APLICACIÓN DE MATERIALES DE  
CAMBIO DE FASE EN CLIMATIZACIÓN**

**Departamento de  
Ingeniería Térmica y de  
Fluidos**

---

## 7. RESULTADOS

### 7.1. ELECCIÓN DEL PCM

La elección del material de cambio de fase adecuado para el siguiente estudio depende de diversos factores: disponibilidad, precio, propiedades termodinámicas, ahorro conseguido, amortización, etc. En este caso, el análisis se ha centrado en las propiedades termodinámicas.

Para ello, se ha realizado una simulación para cada uno de los PCM dentro del rango de temperaturas de cambio de fase entre 23 y 29°C. A continuación, se ha representado la cantidad necesaria de PCM para conseguir el mayor número de días sin que alcance el estado líquido, ya que para conseguir aprovechar las propiedades del PCM es importante mantenerlo en el estado de cambio de fase durante el mayor tiempo posible.

PCM elegidos	$\lambda_{\text{SÓLIDO}}$ [W/m·K]	$\lambda_{\text{LÍQUIDO}}$ [W/m·K]	$\rho$ [kg/m³]	$h_f$ [kJ/kg]	$T_f$ [°C]
MAGIC BOX MEZCLA HIDROC.SAT E INSAT	0,464	0,232	1110	188	23
SP25 A8	0,600	0,598	1380	180	26
AC27	1,85	1,15	867	184,78	27
CLIMSEL C28	0,7	0,5	1420	162	28
RT27	0,2	0,2	870	179	28
PX27	0,1	0,1	640	112	28
GR27	0,2	0,2	750	72	28
DELTA®-COOL 28	1,12	0,56	1555	188	28
SAVENRG PCM 29P*	1,09	0,54	1840	190	29

Tabla 31: Propiedades de los PCM elegidos para la simulación. (Elaboración propia)

La simulación se ha llevado a cabo sobre el muro simple descrito en el Capítulo 6, analizando la cantidad de masa de PCM necesaria para distintas variedades de PCM y observando las diferentes tendencias dependiendo de sus propiedades.

En la Figura 26 se comparan PCM con calor latente similar. Se observa como con pequeñas cantidades de PCM (entre 1,6 y 1,7 kg) es posible mantener el PCM en estado sólido o cambiando de fase durante casi toda la totalidad del periodo estudiado. En este caso, el SAVENRG PCM 29\* consigue los mejores

resultados debidos a su alta densidad. Consiguiendo con el mismo volumen de PCM, mayor almacenamiento.

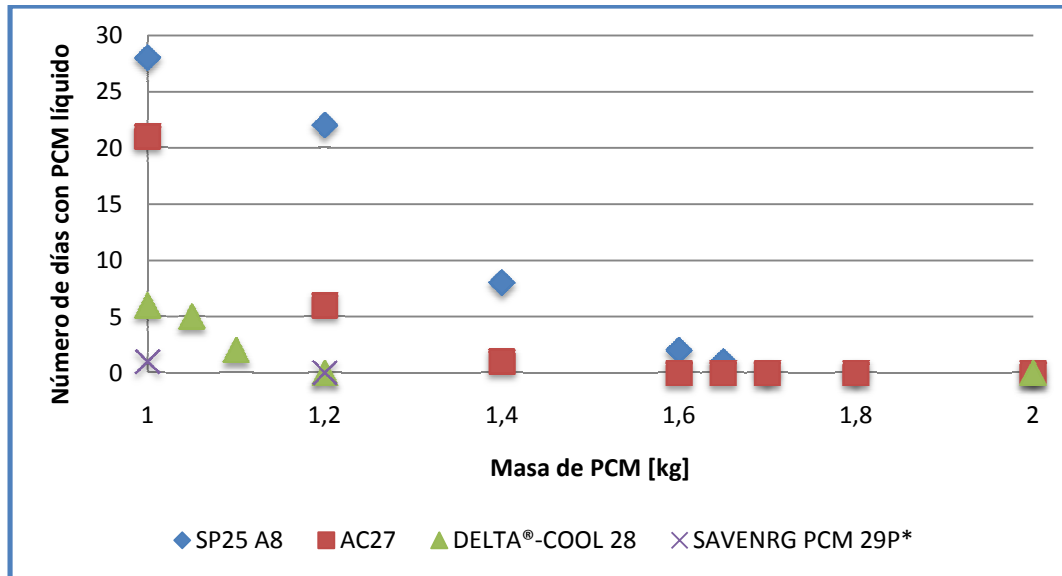


Figura 26: Relación masa PCM en función del número de días con PCM líquido con  $h_f$  similares. (Elaboración propia)

Se ha analizado el comportamiento de los PCM en función de otros factores, para ello, se han analizado aquellos con una temperatura de fusión de  $28^{\circ}\text{C}$ .

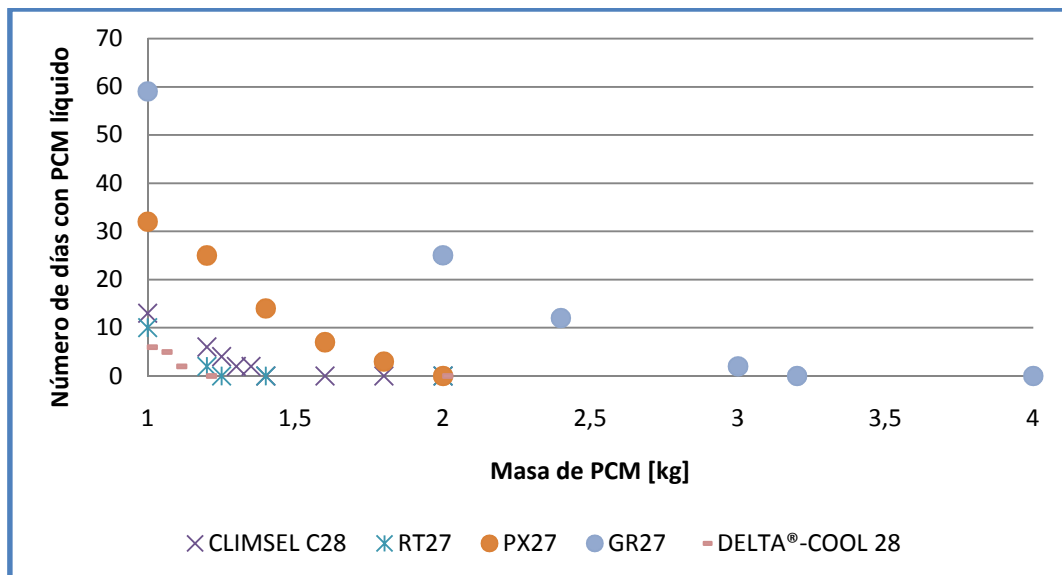


Figura 27: Relación días con PCM líquido en función de la masa de PCM con  $T_f=28^{\circ}\text{C}$ . (Elaboración propia)

En la Figura 27 se observa como el GR27 es el que necesita mayor masa de PCM para evitar que el PCM fusione por completo. Este comportamiento es debido a



su calor latente de apenas 80 kJ/kg, siendo éste casi la mitad de la de los otros PCM mostrados en dicha gráfica.

El que mejor comportamiento consigue es el DELTA COOL 28. Este PCM tiene una buena relación entre su densidad y su calor latente consiguiendo con poca cantidad de material una gran capacidad de almacenamiento de calor.

Para aquellos PCM con temperatura de fusión menor que 28°C se han representado en la Figura 28 para analizar la influencia de la temperatura de fusión a medida que se acerca a la temperatura interior de confort.

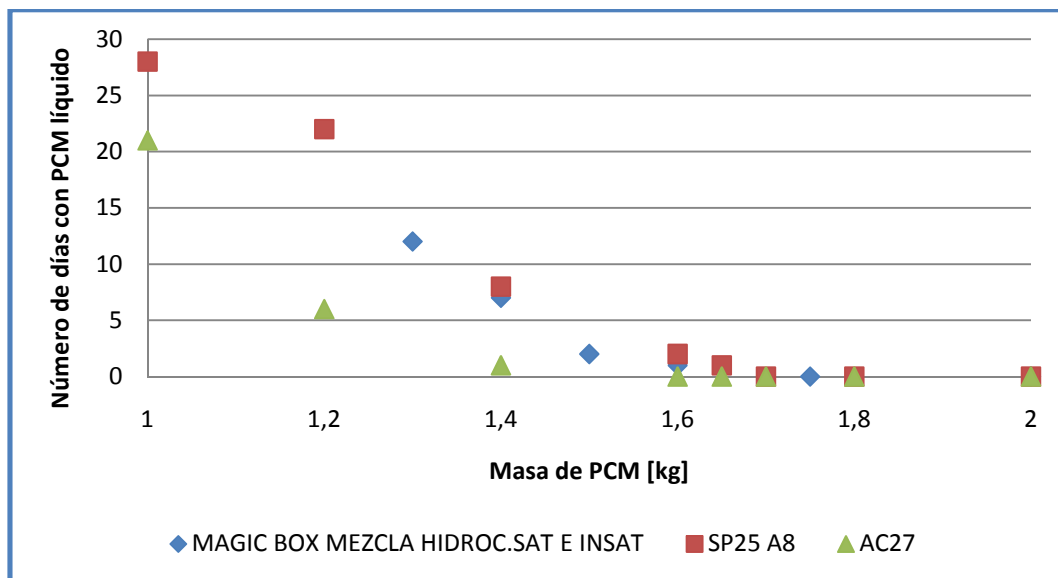


Figura 28: Relación días con PCM líquido en función de la masa de PCM necesaria para  $T_f < 28^\circ\text{C}$ .  
(Elaboración propia)

En la Figura 28 se observa que el AC27 con menor masa consigue mantenerse en estado de cambio de fase durante más tiempo. El hecho de que se comporte mejor no se debe a su temperatura de fusión, sino a que posee unas conductividades térmicas muy altas, contribuyendo a aumentar el UA resultante y así consigue que este PCM entre en estado de cambio de fase mucho antes que los demás PCM.

Para determinar la influencia de la temperatura de fusión se ha procedido a estudiar la influencia de este parámetro en la cantidad de carga térmica que recibe la vivienda.

El siguiente estudio se ha realizado el día 26 de Agosto de 2010, siendo dicho día, uno de los más calurosos del verano de 2010.

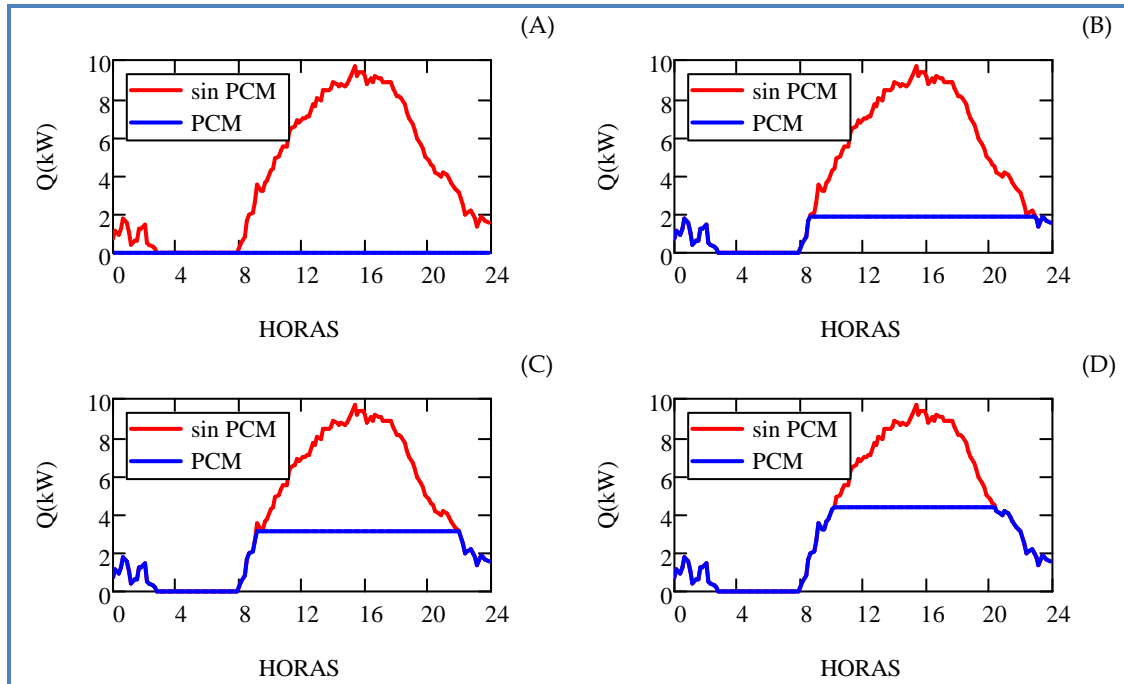


Figura 29: Carga térmica  $T_f=25^\circ\text{C}$  (A),  $T_f=27^\circ\text{C}$  (B),  $T_f=29^\circ\text{C}$  (C),  $T_f=31^\circ\text{C}$  (D). (Elaboración propia)

En la Figura 29 se han representado las cargas térmicas del mismo día con diferentes PCM con similares propiedades pero con distintas temperaturas de fusión. Se observa como en el caso A, la carga que recibe la vivienda es nula, eso es debido a que la temperatura de fusión del PCM coincide con la temperatura de confort interior y a medida que la temperatura de fusión aumenta, tarda más en alcanzar su temperatura de fusión y además permite el paso de mayor carga a la vivienda. Por otro lado, aunque a simple vista la mejor opción sería escoger aquel material con  $T_f$  similar a la temperatura de confort, hay que analizar si dicho material dispone de alta densidad y alto calor latente.

En los demás casos, el área por debajo de la curva que describe el caso con PCM corresponde a aquella demanda térmica que debe ser contrarrestada por un equipo de climatización adecuado para cada circunstancia o incluso optar por una temperatura de confort interior superior.

Para concluir con el estudio, en la Figura 30 se han comparado todos los PCM del rango entre  $23$  y  $29^\circ\text{C}$  consiguiendo una visión global del comportamiento de cada uno de ellos y destacando aquellos con mejores propiedades para este tipo de estudio térmico.

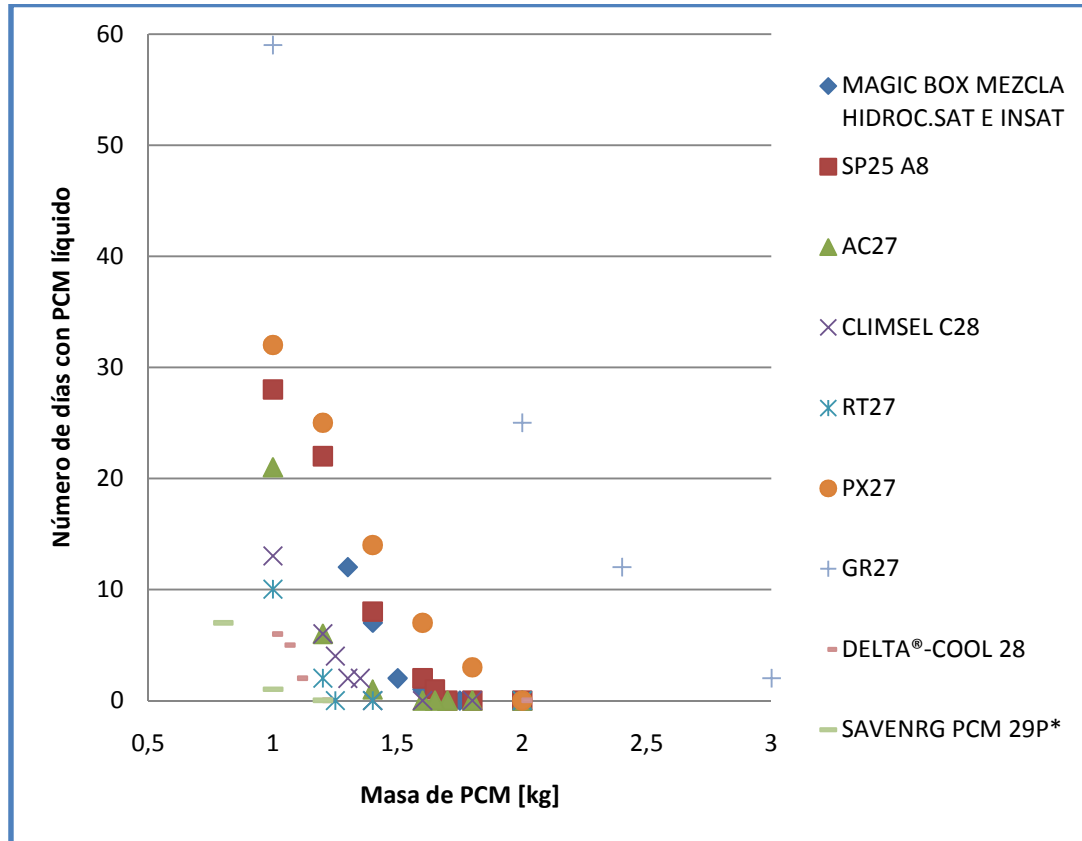


Figura 30: Relación de masa de PCM en función de días con PCM líquido. (Elaboración propia)

En este caso, el material de cambio de fase que consigue evitar el estado líquido con la menor cantidad de masa corresponde al SAVENRG PCM 29P\*, eso es debido a su alta densidad ( $1840 \text{ kg/m}^3$ ) y su alto calor latente ( $190 \text{ kJ/kg}$ ). Pero su temperatura de fusión de  $29^\circ\text{C}$  le aleja de ser el PCM óptimo para su utilización en viviendas.

Como a modo de resumen de los resultados, el PCM adecuado será el que reúna las siguientes cualidades:

- Alta densidad.
- Alto calor latente.
- Temperatura de fusión cercana a la temperatura interior.

Dichas propiedades coinciden con las descritas en el Capítulo 4, donde se han descrito las propiedades idóneas de un PCM.

En el Capítulo 7 y posteriores se ha utilizado el PCM SP25 A8 con temperatura de fusión 26°C, por ser el más cercano a la temperatura de confort elegida (25°C), además su alta densidad y su alto calor latente lo hacen el mejor candidato.

PCM elegidos	$\lambda_{\text{SÓLIDO}}$ [W/m·K]	$\lambda_{\text{LÍQUIDO}}$ [W/m·K]	$\rho$ [kg/m³]	$h_f$ [kJ/kg]	$T_f$ [°C]
MAGIC BOX MEZCLA HIDROC.SAT. E INSAT.	0,464	0,232	1110	188	23
SP25 A8	0,600	0,598	1380	180	26
AC27	1,85	1,15	867	184,78	27
CLIMSEL C28	0,7	0,5	1420	162	28
RT27	0,2	0,2	870	179	28
PX27	0,1	0,1	640	112	28
GR27	0,2	0,2	750	72	28
DELTA®-COOL 28	1,12	0,56	1555	188	28
SAVENRG PCM 29P*	1,09	0,54	1840	190	29

Tabla 32: PCM elegido. (Elaboración propia)

## 7.2. CANTIDAD DE PCM NECESARIA

La cantidad de material de cambio de fase ha sido determinada a través de las simulaciones de la demanda térmica de la vivienda bajo las fluctuaciones de temperatura a lo largo de Junio a Septiembre del año 2010.

Se ha procedido al cálculo de la masa de PCM en dos casos: muro unitario descrito en el Capítulo 6 a modo de ejemplo y la vivienda unifamiliar del estudio.

### 7.2.1. MURO UNITARIO

Utilizando el muro del ejemplo del Capítulo 6 en la Tabla 33 se muestra la masa de PCM y los días que el propio material ha conseguido alcanzar el estado líquido. La cantidad idónea es de 1,7 kg de PCM consiguiendo un 100% de días sin alcanzar líquido. En este caso, es posible conseguir este porcentaje porque la diferencia entre un 95% y un 100% es ínfima. Además el precio de aumentar ese porcentaje no alcanzará una cantidad importante. Más adelante en los casos posteriores esa diferencia de porcentaje supondrá un gasto a veces innecesario comparado con el ahorro conseguido.

Masa PCM [kg]	Días que consigue estado líquido	Porcentaje de días sin alcanzar líquido
1	28	77,0
1,2	22	82,0
1,4	8	93,4
1,6	2	98,4
1,65	1	99,2
1,7	0	100,0

Tabla 33: Cantidad de PCM muro simple. (Elaboración propia)

La cantidad elegida es de 1,7 kg repartidos sobre el metro cuadrado del muro ejemplo.

### 7.2.2. VIVIENDA CON PCM EN PAREDES EXTERIORES

En este apartado se estudia la evolución de la carga térmica en la vivienda al introducir el PCM en las fachadas. Para la realización de las simulaciones se han calculado los coeficientes de transmisión correspondientes a cada mes del periodo analizado. Para ello se ha procedido a la suma de todas las cargas descritas en el Capítulo 6 sustituyendo las propiedades del PCM elegido en el apartado anterior. Cada uno de los UA se ha obtenido despejando de la Ecuación 13.

$$\sum Q = UA \cdot (T_{max\ ext} - T_{int})$$

Ecuación 13

Los valores obtenidos se encuentran detallados en el Anexo I y los resultados de UA necesarios para las simulaciones se muestran en la Tabla 34. La primera columna muestra los UA correspondientes a PCM en estado sólido, la siguiente columna para el caso de PCM líquido. Para determinar si el PCM se encuentra en estado sólido o cambiando de fase, se determina con los valores de la tercera columna que han sido obtenidos sustituyendo en la Ecuación 12. Por último todas las simulaciones han sido comparadas con la misma vivienda sin usar PCM, en ese caso se han utilizado los UA de la última columna.



MESES	UA parcial PCM estado líquido [W/K]	UA parcial PCM estado sólido [W/K]	UA pared del exterior a PCM [W/K]	UA global sin PCM [W/K]
JUNIO	988,304	988,303	312,528	988,301
JULIO	765,930	765,926	312,528	765,912
AGOSTO	745,151	745,143	312,528	745,120
SEPTIEMBRE	1030,995	1030,993	312,528	1030,962

Tabla 34: Coeficientes de transmisión térmica. (Elaboración propia)

Para el siguiente análisis se parte de dos hipótesis:

- Hipótesis 1: En un primer análisis se supone que el PCM situado en las fachadas solo es capaz de almacenar calor que penetre desde el exterior hacia el PCM, es decir, solo influye la carga por transmisión a través del muro.
- Hipótesis 2: En esta segunda hipótesis se impone que el PCM sea capaz de almacenar la carga térmica total de la vivienda, es decir, a través de la fachada es posible almacenar tanto cargas exteriores como interiores.

Se han englobado las cargas que no se incluyen en la primera hipótesis en el parámetro  $Q_o$ . Este parámetro incluye las siguientes cargas:

- Cargas térmicas debidas a la radiación a través de las ventanas.
- Cargas térmicas por transmisión a través de ventanas, puerta, suelo y techo.
- Cargas térmicas por iluminación.
- Cargas térmicas por ventilación.
- Cargas térmicas debidas a los ocupantes.
- Cargas térmicas por infiltraciones.
- Cargas térmicas debidas a infiltraciones.
- Cargas térmicas debidas a equipos.

En primer lugar, la cantidad de PCM necesaria se deduce utilizando el criterio de evitar en el mayor número de días la obtención de estado líquido en el PCM. De esta manera se consigue mantener el PCM durante el mayor tiempo en estado de cambio de fase y así absorber una mayor cantidad de energía. De los datos representados en la Figura 31 se deduce la cantidad óptima de PCM a incluir en las fachadas partiendo de la primera hipótesis detallada anteriormente.

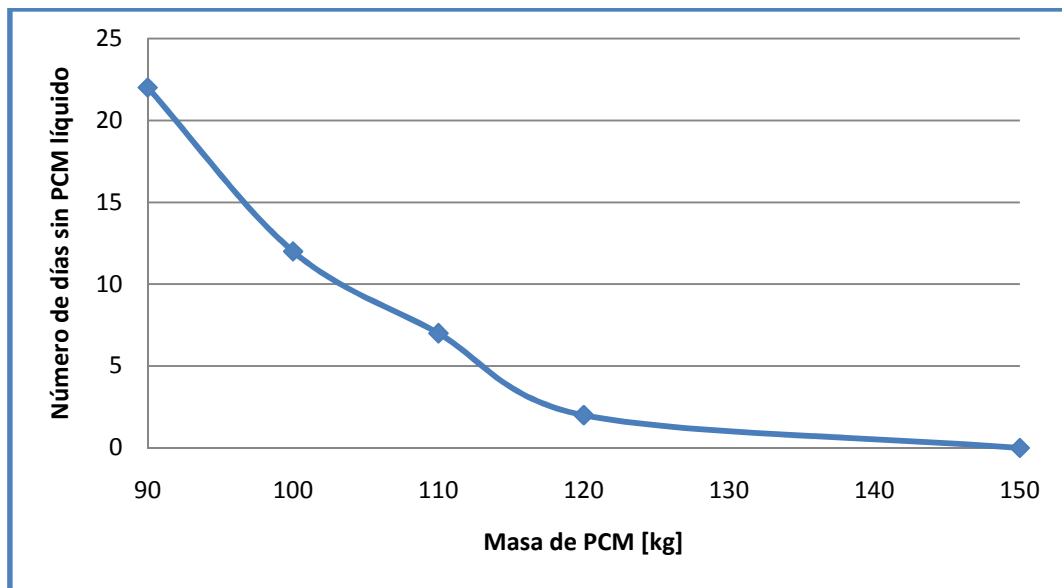


Figura 31: Relación masa de PCM con número de días sin alcanzar estado líquido. Hipótesis 1.  
(Elaboración propia)

Masa de PCM [kg]	%Días sin obtener PCM líquido
90	80,4
100	89,3
110	93,8
120	98,2
150	100,0

Tabla 35: Porcentaje de días sin obtener líquido en función de la masa de PCM. Hipótesis 1.  
(Elaboración propia)

En este caso la cantidad elegida es de 120 kg. Esta cantidad distribuida por toda la superficie de las fachadas corresponde a 1 mm de espesor. Si además incluimos el espesor típico de los contenedores de PCM (2,5 mm), el espesor total aumenta a 6 mm.

Si se parte de la segunda hipótesis, los resultados son muy diferentes y más realistas. Como se observa en la Figura 32, la cantidad óptima de PCM aumenta considerablemente.

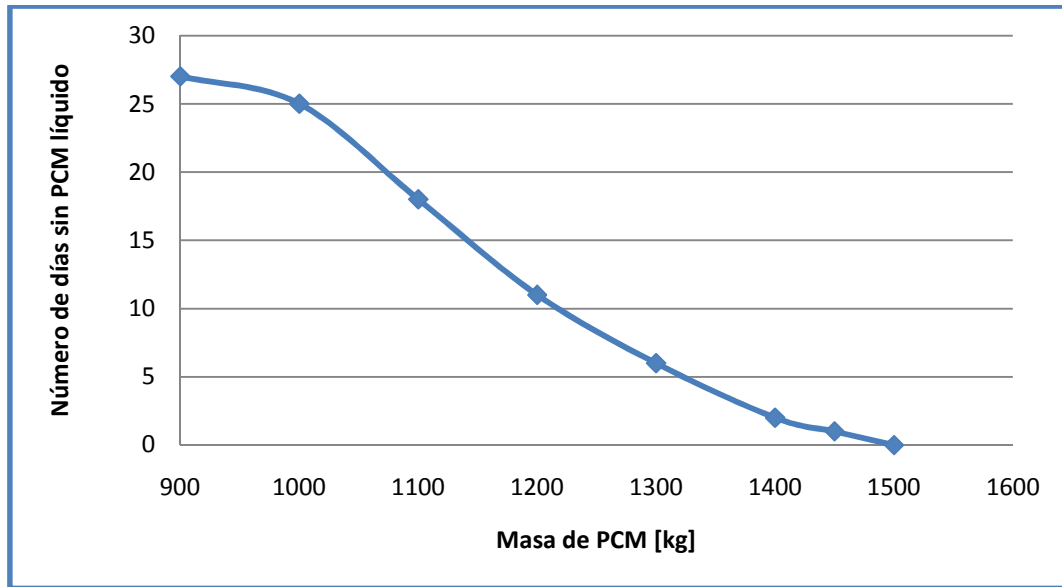


Figura 32: Relación de masa de PCM con el número de días sin obtener líquido. Hipótesis 2.  
(Elaboración propia)

Masa de PCM [kg]	%Días sin obtener PCM líquido
900	75,9
1000	77,7
1100	83,9
1200	90,2
1300	94,6
1400	98,2
1450	99,1
1500	100,0

Tabla 36: Porcentaje de días sin obtener líquido en función de la masa de PCM. Hipótesis 2.  
(Elaboración propia)

La cantidad de PCM seleccionada es 1400 kg. Si se distribuyen por toda la fachada el espesor necesario apenas supera los 1,5 cm. Si además agregamos el espesor de las paredes del contenedor del PCM resulta un espesor de 2 cm.

Una vez elegido el PCM y la cantidad necesaria para incorporarlo a la vivienda se procede a analizar la cantidad absorbida por el material de cambio de fase.



Sustituyendo en la Ecuación 9 con los siguientes datos (masa total de PCM de 1400 kg y  $h_f=188\text{kJ/kg}$ ), se obtiene la cantidad máxima de energía térmica que es capaz de almacenar el PCM y en consecuencia, se consigue evitar que penetre esa energía en la vivienda durante un ciclo de 24 horas.

$$Q_{latente} [\text{kJ}] = h_f \cdot m_{MCF} = 188 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1400 \text{ kg} = 263200 \text{ kJ}$$

### 7.3. EFECTOS DEL PCM SOBRE LA CARGA TÉRMICA

Como se ha comentado en capítulos anteriores, la misión principal del material de cambio de fase es absorber gran cantidad de energía mientras transcurre el cambio de fase. En la Figura 33 se ha representado la carga térmica de la vivienda sin PCM comparado con la carga térmica usando PCM siguiendo la hipótesis 1 y además sin incluir  $Q_o$ .

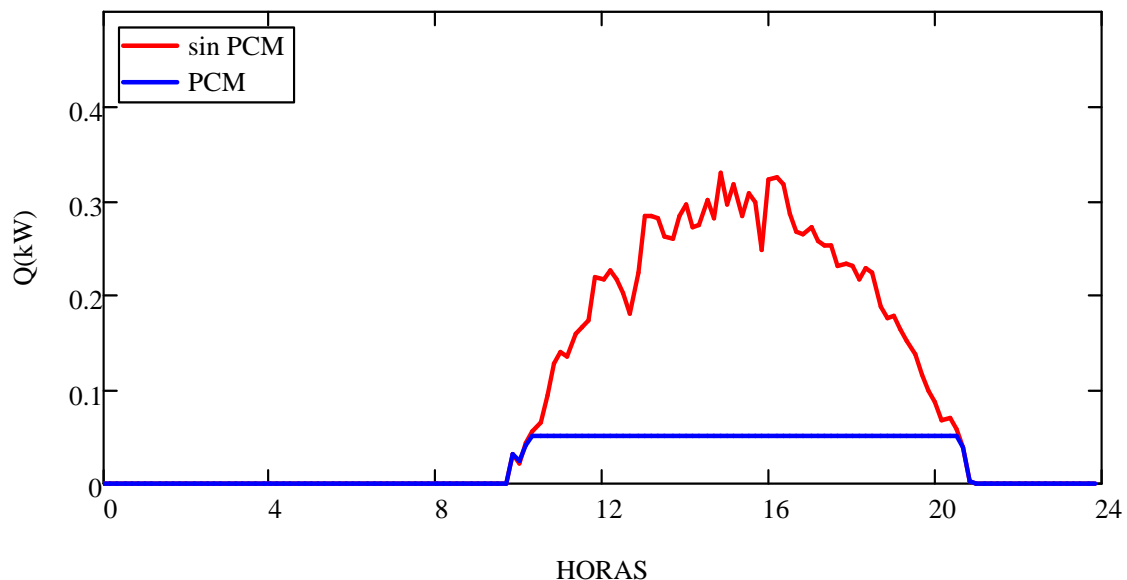


Figura 33: Carga térmica sin  $Q_o$  sobre las fachadas del día 6 de Junio de 2010. Hipótesis 1.  
(Elaboración propia)

Se observa como la carga térmica se reduce considerablemente, consiguiendo durante un periodo de tiempo de aproximadamente 10 horas una entrada de carga térmica constante debido al cambio de fase del PCM. Hay que recordar que en esta simulación no se ha incluido  $Q_o$ , solo se ha representado el calor por transmisión a través de las fachadas debido únicamente a la diferencia de

temperaturas exterior e interior. Por esta razón la demanda térmica no alcanza los 400 W de máxima.

Si incluimos las demás cargas térmicas,  $Q_o$ , se observa en la Figura 34 que la reducción total que ha aportado el PCM es mínima. Si la hipótesis 1 fuese correcta, el uso de PCM en viviendas no podría ser viable.

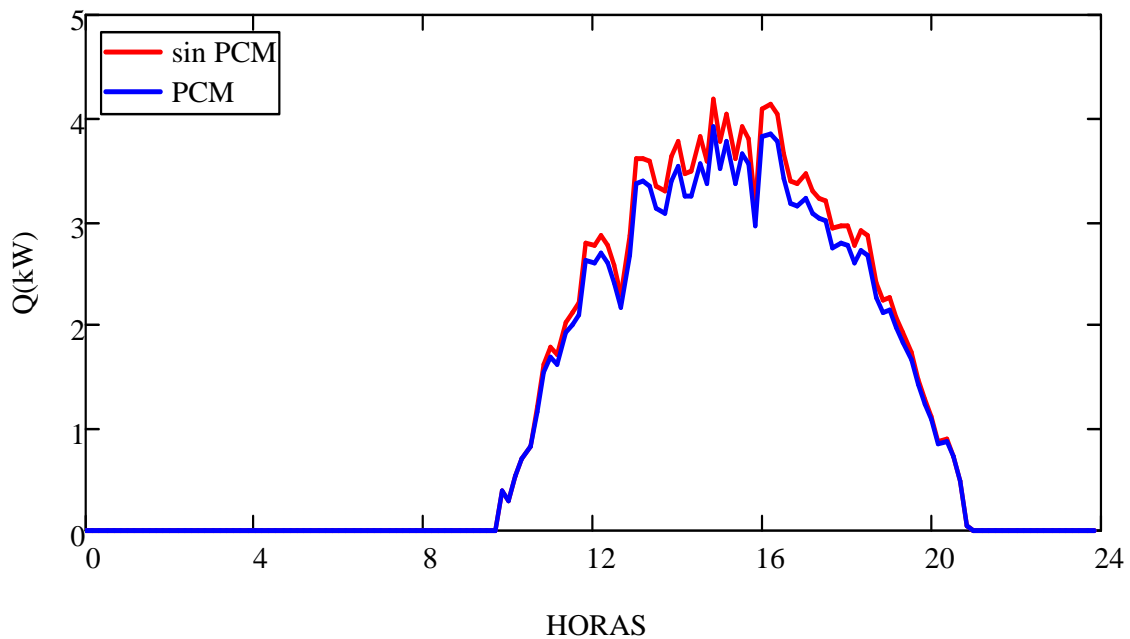


Figura 34: Carga térmica con  $Q_o$  del día 6 de Junio de 2010. Hipótesis 1. (Elaboración propia)

La Figura 35 muestra la diferencia entre las curvas representadas en la Figura 34, mostrando el ahorro resultante debido a la introducción de PCM en las fachadas de la vivienda. El ahorro obtenido dicho día alcanza 1,72 kWh.

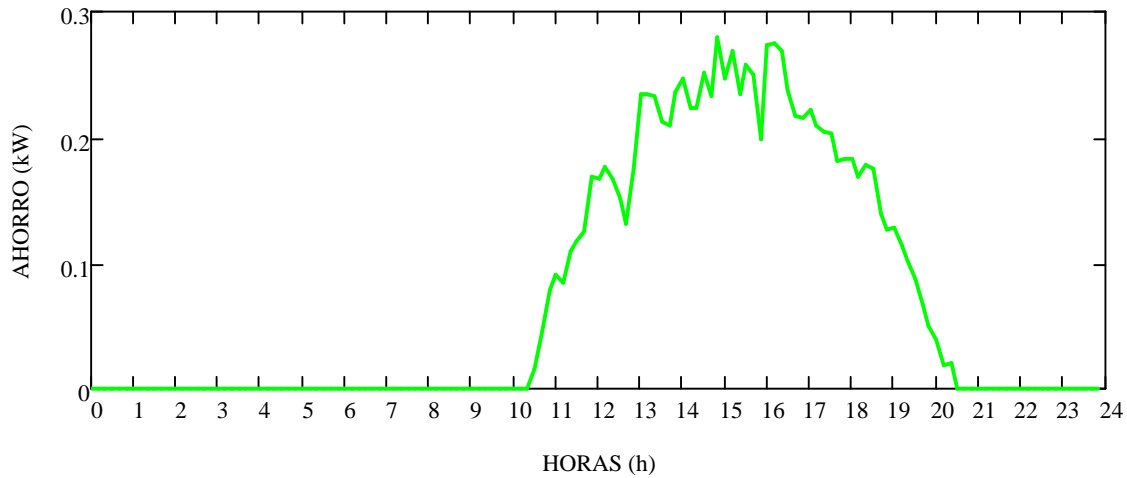


Figura 35: Ahorro conseguido en el interior de la vivienda. Hipótesis 1. (Elaboración propia)

Supongamos que el PCM es capaz de absorber todas las cargas de la vivienda (hipótesis 2). Aunque entrase radiación por las ventanas, el PCM sería capaz de absorber ese calor a través de las paredes. En este caso los resultados cambian, pudiendo observar como la cantidad de PCM necesaria aumenta hasta 1400 kg y el ahorro también aumenta considerablemente. En este caso, la cantidad almacenada no supera al calor latente del PCM. Esto quiere decir que las temperaturas después de conseguir alcanzar la temperatura de fusión han bajado conduciendo al material de cambio de fase al estado sólido de nuevo, sin alcanzar el estado líquido y sin poder aprovechar todo el potencial de este tipo de materiales.

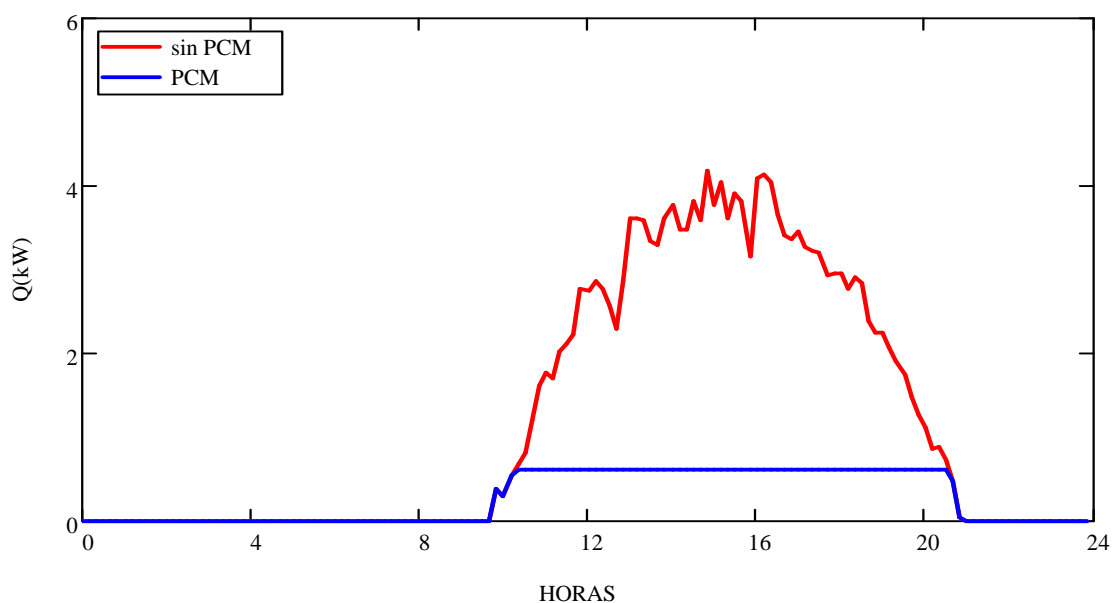


Figura 36: Carga térmica con  $Q_o$  del día 6 de Junio de 2010. Hipótesis 2. (Elaboración propia)

Las cargas térmicas diarias se encuentran detalladas en la Tabla 37 comparando ambos métodos de cálculo.

	Hipótesis 1	Hipótesis 2
<b>Carga térmica total sin PCM [kWh]</b>	28,772	28,772
<b>Carga térmica total con PCM [kWh]</b>	27,042	6,738
<b>Ahorro total [kWh]/[MJ]</b>	1,728/6,221	21,26/79,32
<b>Capacidad total de almacenamiento [MJ]</b>	21,6	270

Tabla 37: Tabla comparativa de los resultados del día 6 de Junio de 2010. (Elaboración propia)

Si se observan los datos comparativos de ambos casos en la Tabla 37, el ahorro obtenido bajo la hipótesis 2 alcanza un valor de 21,26 kWh (79,32 MJ). Aunque no alcance la capacidad de almacenamiento del PCM (270 MJ) supera al ahorro obtenido bajo la primera hipótesis. Esta gran diferencia reside en la capacidad de captar calor no solo debido a la transmisión por diferencia de temperatura entre el exterior y el interior, tal y como defiende la primera hipótesis, sino que el material puede almacenar todo el calor que la vivienda contenga.

A continuación se analiza la demanda térmica cuando el PCM alcanza el estado líquido. Para ello, se ha escogido el día con temperaturas más elevadas que corresponde al día 6 de Julio de 2010.

Sus temperaturas están representadas en la Figura 37 comparadas con la temperatura de fusión de 26°C y la temperatura de confort de diseño de 25°C. Dichas temperaturas generan una gran carga térmica entrante a la vivienda, necesitando un equipo de climatización que contrarreste esa carga térmica para mantener la temperatura interior igual a la temperatura de diseño.

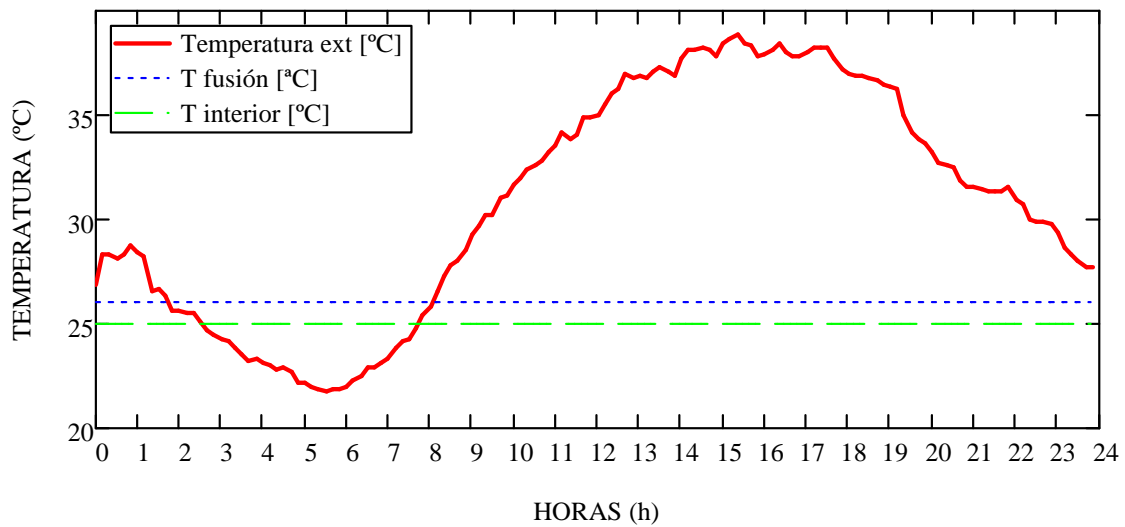


Figura 37: Temperaturas durante el día 6 de Julio de 2010. (Elaboración propia)

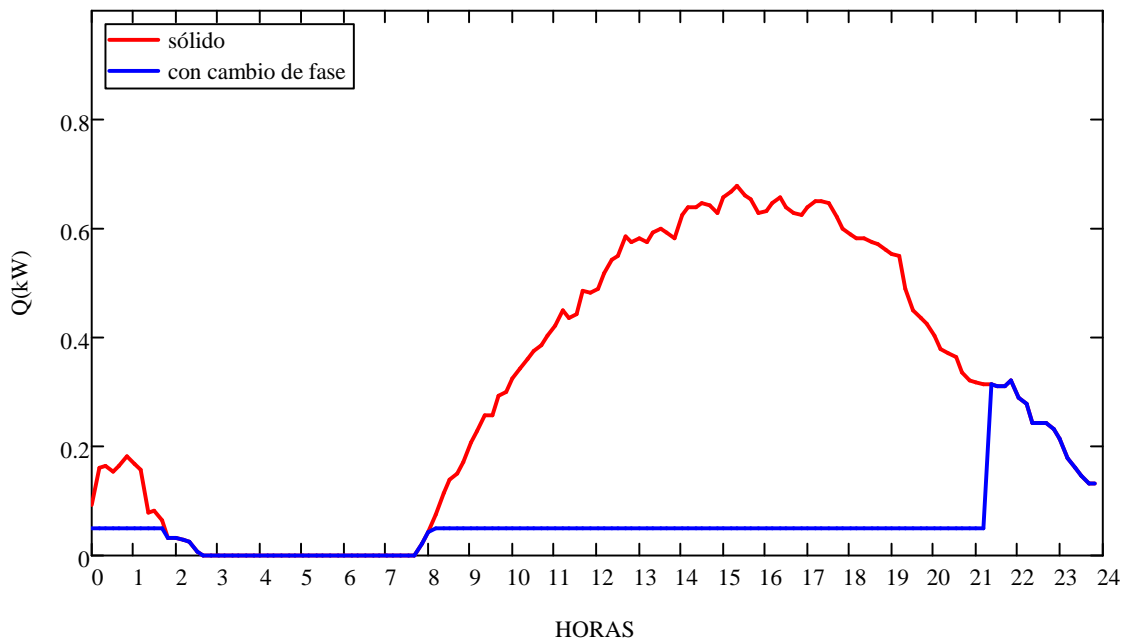


Figura 38: Carga térmica sin  $Q_o$  del día 6 de Julio de 2010. Hipótesis 1. (Elaboración propia)

La figura anterior representa la carga que atraviesa las fachadas exteriores sin añadir  $Q_o$  bajo la hipótesis 1. En cambio en la Figura 39, se muestra la carga total dentro de la vivienda también bajo la hipótesis 1, pudiéndose observar como la demanda ha sido reducida en una pequeña parte.

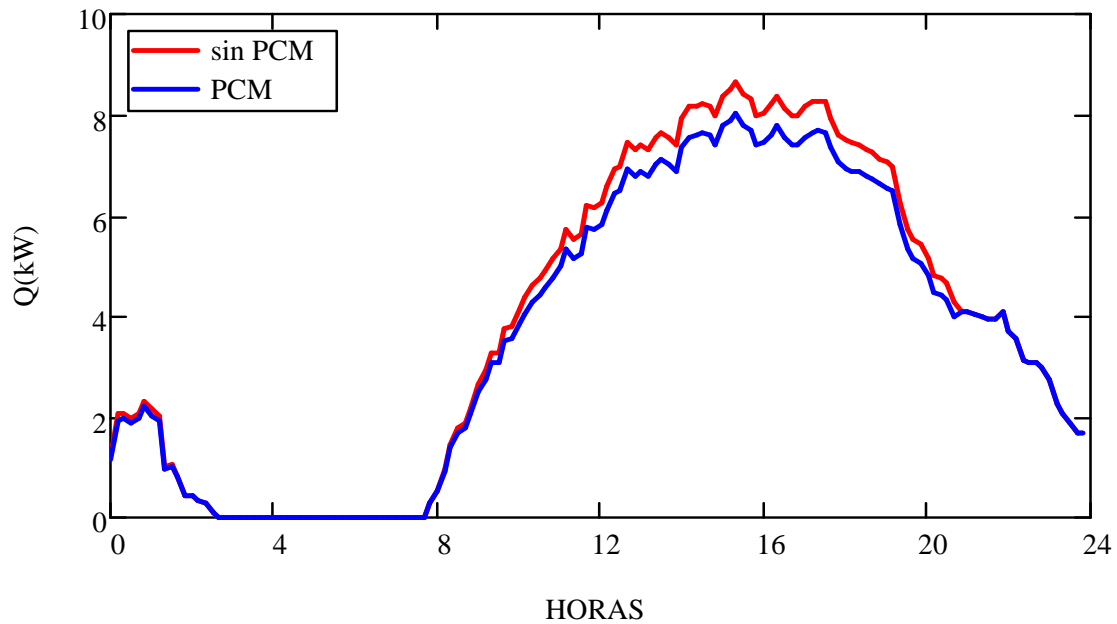


Figura 39: Carga térmica total con  $Q_o$  del día 6 de Julio de 2010. Hipótesis 1. (Elaboración propia)

En la Figura 40 se puede observar bajo la segunda hipótesis cuando el PCM alcanza la fase líquida. Comenzamos a detallar este comportamiento desde las primeras horas del día analizado:

La primera curva que aparece a primeras horas del día corresponde al día anterior cuyas temperaturas fueron también elevadas y consiguieron mantener el PCM cambiando de fase hasta esas horas. Teniendo en cuenta la curva principal, entre las 8 y 24h, se ha conseguido mantener el material de cambio de fase a la temperatura de fusión. A partir de las 20h, se observa como la curva vuelve a seguir la carga del caso sin PCM, eso puede explicarse a que el material ha alcanzado el estado líquido y los UA correspondientes son muy similares.

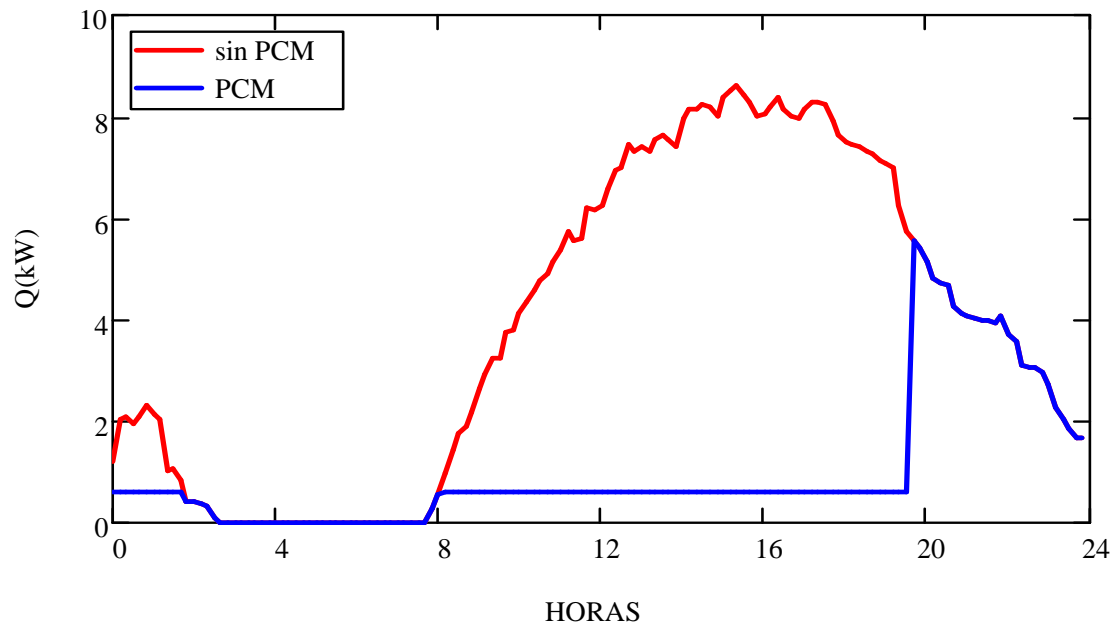


Figura 40: Carga térmica del día 6 de Julio de 2010. Hipótesis 2. (Elaboración propia)

La Tabla 38 muestra la demanda térmica con y sin PCM bajo las dos hipótesis indicando además como el ahorro total coincide con la capacidad total de almacenamiento del PCM.

	Hipótesis 1	Hipótesis 2
Carga térmica total sin PCM [kWh]	93,122	93,122
Carga térmica total con PCM [kWh]	87,201	18,122
Ahorro total [kWh]/[MJ]	5,921/21,6	75/270
Capacidad total de almacenamiento [MJ]	21,6	270

Tabla 38: Tabla comparativa de los resultados del día 6 de Julio de 2010. (Elaboración propia)

## 7.4. AHORRO OBTENIDO

El ahorro diario obtenido en las simulaciones del periodo de Junio a Septiembre teniendo en cuenta solo la hipótesis 2 viene representado en la Figura 41.

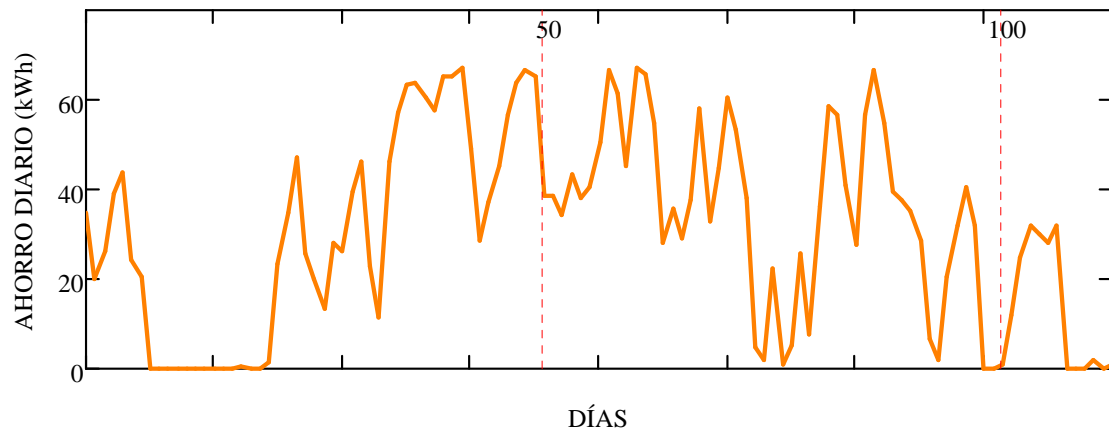


Figura 41: Ahorro diario en kWh. Hipótesis 2. (Elaboración propia)

Existen días que alcanzan ahorros de hasta 75 kWh. Aquellos días son los que han conseguido almacenar el máximo que permite el PCM. La Tabla 39 muestra las demandas totales del verano de 2010 y el ahorro conseguido en dicho periodo.

Demanda durante el verano sin PCM [kWh]	Demanda durante el verano con PCM [kWh]	Ahorro durante el verano [kWh]
5254	2258	2996

Tabla 39: Demandas totales durante todo el verano. (Elaboración propia)

El ahorro medio por día es de 26,75 kWh.



## 8. ELECCIÓN DE AIRE ACONDICIONADO

Para el dimensionamiento del equipo de aire acondicionado se ha recurrido al catálogo de Roca. En dicho catálogo, para la elección del equipo es necesario definir la demanda térmica pico con la que se decide el tipo de aire acondicionado más adecuado.

Para analizar más adelante los beneficios de la instalación de PCM, se ha procedido a la determinación del equipo necesario antes y después de la incorporación de PCM en la vivienda.

Carga térmica pico sin PCM [kW]	9,684
Carga térmica pico con PCM [kW]	2,872

Tabla 40: Cargas térmicas pico con y sin PCM [kW]. (Elaboración propia)

El equipo seleccionado depende de las demanda pico, de esta manera garantizamos el correcto funcionamiento durante todo el periodo del verano.

Para el caso de la instalación con uso de materiales de cambio de fase se ha elegido un equipo denominado Split Mural Inverter BGT de Roca York con una capacidad máxima de 3,5 kW. En cambio, para el caso de la vivienda sin PCM, el equipo elegido consta de dos unidades de Split Mural Inverter BGY de Roca York con una capacidad máxima de 5,3 kW cada uno. Para obtener más información sobre estos equipos consulte el Anexo II.

En la Tabla 41 y Tabla 42 se detallan los precios desglosados por unidad interior y exterior de los equipos seleccionados.

MODELO		CAPACIDAD FRIGORÍFICA [kW]	CAPACIDAD CALORÍFICA [kW]	PRECIO [€]
U. exterior	YVJC 09 DS-AAR			620
U. interior	YVKC 09 DS-AAR			330
DBOI / DBMI 25 BGT	YVJC / YVKC 09 DS-AAR	2,5 (1,0 - 3,2)	2,7 (1,1 - 3,5)	950

Tabla 41: Precios del equipo de aire acondicionado Split Mural Inverter BGT-R410 A. (York Aire Acondicionado, 2009)

MODELO	CAPACIDAD FRIGORÍFICA [kW]	CAPACIDAD CALORÍFICA [kW]	PRECIO [€]
U. exterior DBOI 50 BGY 683805031			795
U. interior DBMI 50 BGY 683865031			425
DBOI / DBMI 50 BGY 693895031	5,3 (2,5 – 5,8)	5,9 (2,3 – 6,4)	1220

Tabla 42: Precios del equipo de aire acondicionado Split Mural Inverter BGY. (York Aire Acondicionado, 2009)

El EER o Energy Efficiency Ratio es el coeficiente de eficiencia frigorífica. Mide la eficiencia energética de la producción del frío, bien en aparatos de aire acondicionado, bomba de calor, etc. Representa el rendimiento energético de la bomba de calor cuando funciona en modo frío.

$$EER = \frac{\text{Capacidad frigorífica [W]}}{\text{Consumo eléctrico en frío [W]}}$$

Ecuación 14

El EER de ambos modelos, Split Mural Inverter BGT y Split Mural Inverter BGY coincide y toma un valor de 3,4 según catálogos comerciales. Otras publicaciones más imparciales rebajan esta cantidad hasta 2,6. Si despejamos el consumo eléctrico en frío para cada uno de los dos modelos se obtienen los resultados mostrados en Tabla 43.

MODELO	Demanda térmica durante todo el verano [kWh]	Consumo eléctrico total durante todo el verano [kWh]
Split Mural Inverter BGT	2258	664
Split Mural Inverter BGY	5254	1545

Tabla 43: Demanda térmica y consumo eléctrico durante el verano para ambos equipos. (Elaboración propia)

Los datos obtenidos en el caso de la vivienda sin PCM están dentro de los valores típicos de consumo en aire acondicionado durante los meses de verano.(Fundación Vida Sostenible, 2011).

## 9. ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL

### 9.1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción es uno de los que genera mayor impacto ambiental. Los edificios consumen entre el 20% y el 50% de recursos naturales como madera, minerales, agua y combustibles fósiles y contribuyen en gran manera al aumento de las emisiones y la contaminación, tanto durante el proceso de construcción como a lo largo de su vida útil, una vez terminados.

Por otra parte resulta elevado el impacto de su emplazamiento sobre el territorio, alrededor del 80% de las personas residen en zonas urbanas, con la consiguiente influencia negativa en otros sectores como el de transporte y la energía.

Otro tema importante es la generación de residuos de la construcción, de mantenimiento y de derribo de los edificios, con perspectivas de aumento y dificultades para su reutilización o reciclaje.

Uno de los pasos a seguir para evitar estos inconvenientes es optar por un modelo de Construcción Sostenible, basado en unos principios que podríamos llamar ecológicos y que se enumeran a continuación:

- Conservación de recursos.
- Reutilización de recursos.
- Utilización de recursos Reciclables y Renovables en la construcción.
- Consideraciones respecto a la gestión del ciclo de vida de las materias primas utilizadas, con la correspondiente prevención de residuos y de emisiones.
- Reducción en la utilización de energía.
- Incremento de la calidad, tanto en lo que atiende a materiales, como a edificaciones y ambiente urbanizado.

- Protección del Medio Ambiente.
- Creación de un ambiente saludable y no tóxico en los edificios.

Al igual que el resto de las energías renovables, las aplicaciones térmicas de almacenamiento de energía a través de PCM presentan muchos beneficios medioambientales. Por un lado reduce la contaminación atmosférica al contribuir al calentamiento natural de la vivienda, con nula o escasa repercusión sobre el suelo, agua y vegetación. Y por otro lado también es muy importante, aunque es difícil de cuantificar, el confort que proporciona a los usuarios de la vivienda.

La contaminación atmosférica, problema que ha estado muy presente los últimos años y más aún el efecto invernadero, es un fenómeno muy conocido y comentado debido a sus graves efectos posibles. El CO<sub>2</sub> causa alrededor del 30% del efecto. La consecuencia principal del efecto de invernadero es el calentamiento global de la atmosfera, el cual puede provocar el deshielo de los polos y el aumento consecuente del nivel del mar, la inundación de ciudades costeras y ribereñas, y la pérdida de biodiversidad. Además contribuye a la desertización de áreas cercanas a los trópicos, y por tanto, al aumento de hambrunas y conflictos internacionales. Por ello, es necesario que toda la sociedad se conciencie para evitar y disminuir estos riesgos.

La manera de detener estos cambios climáticos es la utilización de energías limpias, y como se ha demostrado en este proyecto, el uso de materiales pasivos que no necesitan cuidados especiales y además no son dañinos para nuestro entorno, contribuyen de forma positiva a este deseo.

## 9.2. CÁLCULO DE EMISIONES

El uso de PCM reduce la carga térmica en la vivienda pero aún así, es necesario el uso de un equipo auxiliar para contrarrestar la carga restante.

Los equipos auxiliares consumen electricidad que a su vez contribuyen a emitir dióxido de carbono y otros contaminantes a la atmosfera, aumentando globalmente la contaminación atmosférica.

Mes	Demanda no atendida con el uso de PCM [kWh]	Consumo eléctrico [kWh]
JUNIO	383,33	112,74
JULIO	1393,83	409,95
AGOSTO	977	287,35
SEPTIEMBRE	320,86	94,2

Tabla 44: Demandas no atendidas y consumo eléctrico por meses. (Elaboración propia)

Haciendo uso de los factores de emisión del mix eléctrico español es posible calcular las emisiones de gases contaminantes con el uso de los equipos de aire acondicionado instalados en la vivienda.

CO <sub>2</sub> eq [kg/kWh]	SO <sub>x</sub> [g/kWh]	NO <sub>x</sub> [g/kWh]	COV [g/kWh]	PM <sub>2.5</sub> [g/kWh]	PM <sub>10</sub> [g/kWh]	RAA [kg/kWh]	RMA [cm <sup>3</sup> /kWh]
0,215	0,980	0,428	0,012	0,013	0,024	0,288	0,00236

Tabla 45: Factores de emisión del Mix Eléctrico español en 2010. (Alonso, 2011)

Si se desea calcular las emisiones debidas al consumo de electricidad de la vivienda solo hay que multiplicar la energía eléctrica consumida de la red durante los meses estudiados por el factor de emisión del gas a considerar del Mix Eléctrico español.

MESES	CO <sub>2</sub> eq [kg]	SO <sub>x</sub> [g]	NO <sub>x</sub> [g]	COV [g]	PM <sub>2.5</sub> [g]	PM <sub>10</sub> [g]	RAA [kg]	RMA [cm <sup>3</sup> ]
JUNIO	24,2	110,4	48,2	1,3	1,4	2,7	32,4	0,26
JULIO	88,1	401,7	175,4	4,9	5,3	9,8	118,1	0,96
AGOSTO	61,7	281,6	122,9	3,4	3,7	6,8	82,7	0,67
SEPTIEMBRE	20,2	92,3	40,3	1,1	1,2	2,2	27,1	0,22
TOTAL	194,4	886,1	387	10,8	11,7	21,7	260,4	2,13

Tabla 46: Ahorro de emisiones de diversos gases contaminantes. (Elaboración propia)

Las emisiones de CO<sub>2</sub> están representadas por meses y comparadas con las emisiones incluyendo PCM o no en la vivienda. De aquí se puede observar claramente una disminución de más del 50% cuando se incorpora PCM en la vivienda.

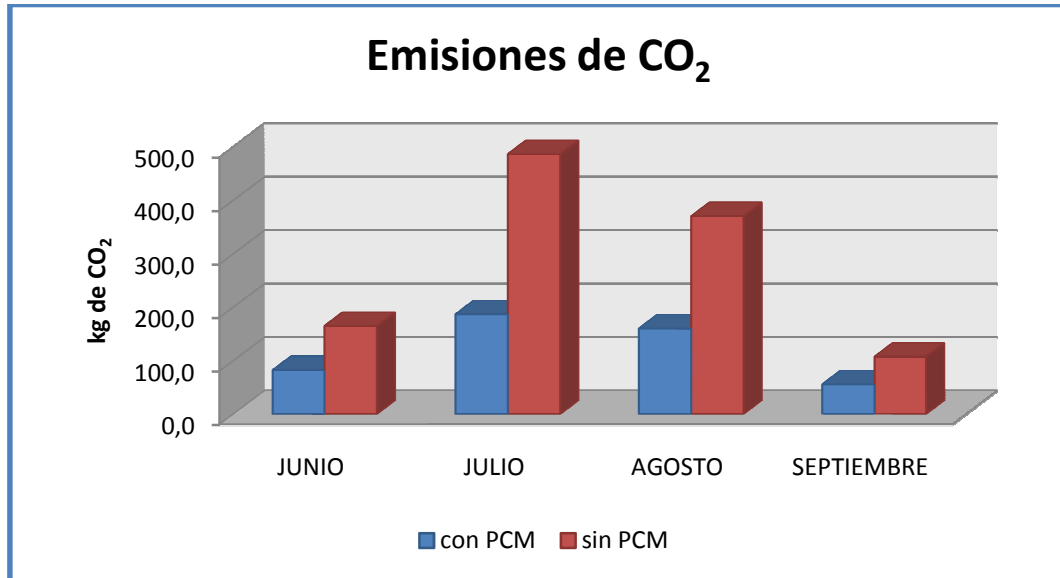


Figura 42: Emisiones de CO<sub>2</sub>. (Elaboración propia)

En la Tabla 47 y Tabla 48 se detallan las emisiones antes y después de incorporar el material de cambio de fase durante los meses de Junio a Septiembre, indicando además el total de emisiones de estos gases y partículas contaminantes.

MESES	CO <sub>2</sub> [kg]	SO <sub>x</sub> [g]	NO <sub>x</sub> [g]	COV [g]	PM2.5 [g]	PM10 [g]	RAA [kg]	RMA [cm <sup>3</sup> ]
JUNIO	82,6	376,3	164,4	4,6	5,0	9,2	110,6	0,91
JULIO	186,9	851,8	372,0	10,4	11,3	20,9	250,3	2,05
AGOSTO	160,3	730,6	319,1	8,9	9,7	17,9	214,7	1,76
SEPTIEMBRE	55,6	253,7	110,8	3,1	3,4	6,2	74,5	0,61
TOTAL	485,4	2212,4	966,2	27,1	29,3	54,2	650,2	5,33

Tabla 47: Emisiones de gases contaminantes con el uso de PCM. (Elaboración propia)

MESES	CO <sub>2</sub> [kg]	SO <sub>x</sub> [g]	NO <sub>x</sub> [g]	COV [g]	PM2.5 [g]	PM10 [g]	RAA [kg]	RMA [cm <sup>3</sup> ]
JUNIO	165,0	752,0	328,4	9,2	10,0	18,4	221,0	1,81
JULIO	486,6	2218,1	968,7	27,2	29,4	54,3	651,8	5,34
AGOSTO	370,5	1688,9	737,6	20,7	22,4	41,4	496,3	4,07
SEPTIEMBRE	107,7	490,8	214,4	6,0	6,5	12,0	144,2	1,18
TOTAL	1129,8	5149,7	2249,1	63,1	68,3	126,1	1513,4	12,4

Tabla 48: Emisiones de gases contaminantes sin el uso de PCM. (Elaboración propia)

Por último se incluye la Figura 43 con los ahorros en emisiones obtenidos y así poder observar de forma gráfica como en Julio fue cuando los ahorros fueron

superiores debido a que corresponde al periodo con mayores temperaturas, creando mayor necesidad de uso del equipo de aire acondicionado.

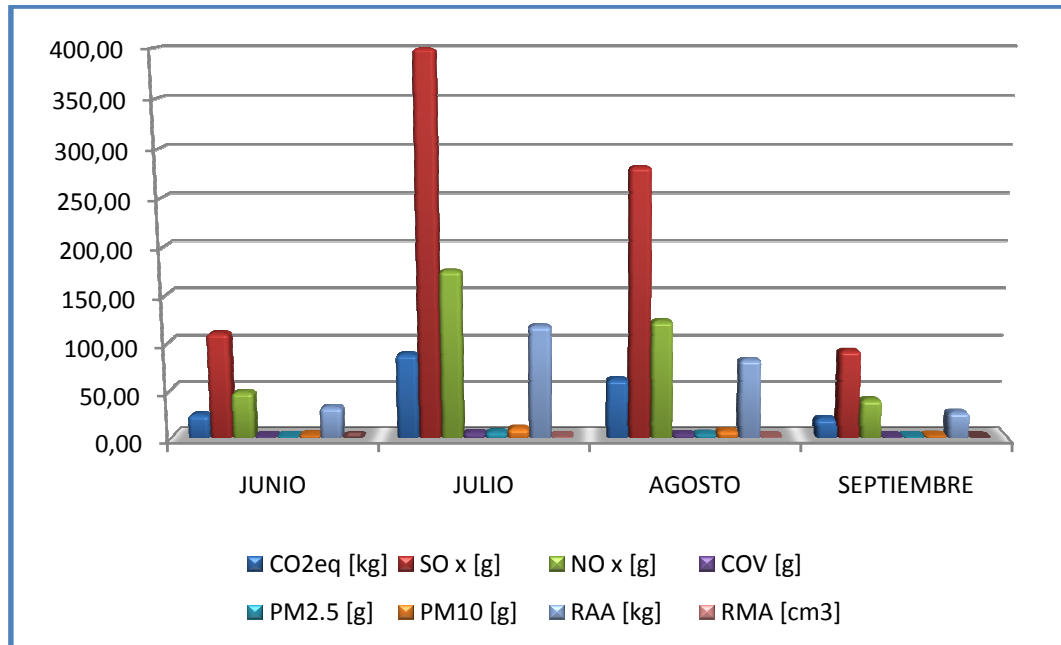


Figura 43: Ahorro en las emisiones con el uso de PCM. (Elaboración propia)



**ANÁLISIS TÉRMICO DE LA  
APLICACIÓN DE MATERIALES DE  
CAMBIO DE FASE EN CLIMATIZACIÓN**

**Departamento de  
Ingeniería Térmica y de  
Fluidos**

---



## 10. ESTUDIO ECONÓMICO

### 10.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza el estudio económico de la incorporación de materiales de cambio de fase para después analizar la viabilidad de dicho proyecto.

En primer lugar, se procede al cálculo de la inversión inicial que supone la instalación de PCM incluyendo el coste total en materiales de cambio de fase, mano de obra y el equipo de climatización.

Por último, se analiza el periodo de retorno, el tiempo en amortizar la inversión inicial.

### 10.2. CÁLCULO DEL COSTE INICIAL DE LA INSTALACIÓN

El precio medio del PCM elegido (SP25 A8) no se ha encontrado en la bibliografía, por esta razón se ha recurrido a estimar un precio medio de este PCM. El coste de materiales de cambio de fase varía desde 2-3 euros a 100 euros por kilo, descartando usos más específicos en cuyo caso el valor aumenta considerablemente. El coste elegido es de 5,5 €/kg ya que los costes de PCM con características similares se encuentran en el mercado con precios similares al elegido.

El coste inicial no solo depende del coste del PCM sino que depende de si nos encontramos en una u otra situación de las mostradas a continuación:

- Construcción nueva.
- Reconstrucción.

Si el edificio está siendo diseñado, la incorporación de PCM en su estructura no supone una gran inversión. Por ello, el coste de su instalación supondrá el coste de la materia prima y el correspondiente a la mano de obra necesaria para su instalación. En cambio, si la vivienda ya existe, su incorporación se complica si

se desea incluirlo dentro de los muros de la casa. En este caso, la solución más adecuada sería instalar los PCM sobre el exterior de la vivienda o instalarlo sobre el pavimento. Esto supone un coste adicional que no es objeto de este proyecto.

El coste total del material de cambio de fase es 7700 €, siendo 1400 kg a 5,5 €/kg. El coste de mano de obra se tendrá en cuenta tomando un 3% del coste de la materia prima, 231 €. Además debe incluirse el coste del equipo de climatización con un valor de 950 €. La inversión inicial requerida asciende a 8881€.

En el caso de no instalar PCM, la inversión inicial es la correspondiente al equipo de aire acondicionado, que en este caso se han elegido dos unidades de 1220 € cada uno, siendo un total de 2440 €.

Para calcular el tiempo de amortización, la inversión inicial será la diferencia de ambos métodos, ya que es el esfuerzo económico extra que supone la incorporación del PCM.

	INVERSIONES INICIALES[€]	
	SIN PCM	CON PCM
EQUIPOS DE AIRE	2440	950
COSTE PCM	-	7700
MANO DE OBRA	-	231
TOTAL [€]	2440	8881

Tabla 49: Inversión inicial. (Elaboración propia)

La diferencia de ambos casos resulta ser de 6441 € que corresponde al gasto extra que supone la incorporación de PCM.

### 10.3. AHORRO ECONÓMICO

El consumo eléctrico en climatización sin uso de PCM (Tabla 43) alcanza los 1545 kWh y con PCM (Tabla 43) supone una reducción de más del 50%, con un total de 664 kWh.

La diferencia de los consumos anteriores resulta ser el ahorro energético en climatización obtenido al usar PCM.

El precio por kWh según la empresa CHC ENERGÍA es de 0,14 €/kWh, por tanto el ahorro que se produce es el siguiente:

$$\text{Gasto electricidad}[\text{€}] = \text{consumo}[\text{kWh}] \cdot \text{Precio}[\text{€/kWh}]$$

Ecuación 15

	Gasto electricidad[€]
Sin PCM	216,3
Con PCM	92,96
Ahorro	123,34

Tabla 50: Gastos en electricidad durante el verano. (Elaboración propia)

Se ha alcanzado un 57% de ahorro en la factura eléctrica correspondiente a la climatización durante el verano.

## 10.4. PERIODO DE AMORTIZACIÓN

En este apartado se han recurrido a dos métodos de cálculo del periodo de amortización.

### 10.4.1. MÉTODO DE BA

La amortización es un término económico y contable que da información de la rentabilidad de un proyecto. El periodo de amortización es el tiempo que tarda una inversión en ser rentable. Dicho cálculo se realiza mediante la Ecuación 16.

$$BA = A \cdot \sum_{1}^n \left( \frac{1+c}{1+i} \right)^n - M \cdot \sum_{1}^n \left( \frac{1+e}{1+i} \right)^n - I$$

Ecuación 16

Donde:

- A Ahorro anual [€]. Su valor es 123,34€. (Ver Tabla 50).
- c Incremento del coste de la electricidad, su valor es 3,7% (valor tomado del Ministerio de Economía y Hacienda).
- e Tasa de inflación anual, cuyo valor es del 3,2% (valor tomado del Ministerio de Economía y Hacienda).
- M Coste de mantenimiento, considerado el 1% del coste de la inversión inicial. Cuyo valor es de 64,41€/ anuales.
- i Interés bancario, cuyo valor es del 3,4%.
- I Inversión inicial, cuyo valor es 6441€. (Ver Tabla 49).
- n Número de años de los que consta el estudio, se toman 30 años.

Número de años	BA
1	-6370,7
2	-6300,5
3	-6218,4
4	-6124,1
5	-6017,0
6	-5896,5
7	-5762,0
8	-5612,8
9	-5448,2
10	-5267,2
11	-5069,1
12	-4852,9
13	-4617,6
14	-4362,1
15	-4085,1
16	-3785,4
17	-3461,7
18	-3112,4
19	-2736,0
20	-2330,7
21	-1894,8
22	-1426,2
23	-923,0
24	-382,8
25	196,7
26	818,1
27	1484,2
28	2197,9
29	2962,3
30	3780,8

**Tabla 51: Valores de BA para cada año. (Elaboración propia)**

En la Figura 44 se muestra la evolución del parámetro BA a través de los años. El punto de corte de dicha curva muestra el periodo de amortización.

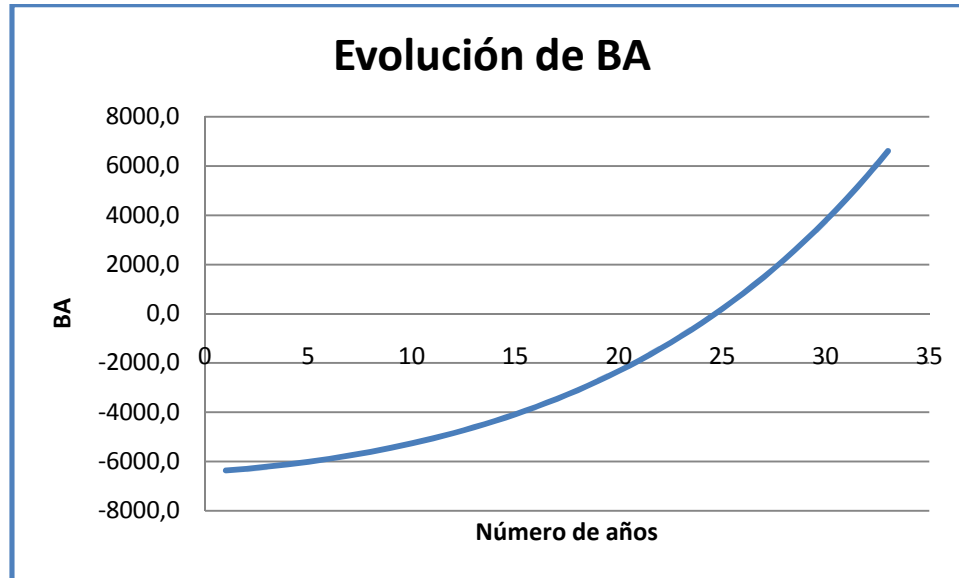


Figura 44: Evolución de BA. (Elaboración propia)

Según el parámetro BA, los primeros años indican beneficios negativos, hasta que se consigue una amortización del capital invertido. Ese periodo de amortización corresponde a 24 años. A partir de ese año, la instalación de PCM crea beneficios, no en forma de ingresos, sino en forma de ahorro en la factura de la luz.

#### 10.4.2. MÉTODO DEL PAY-BACK

El *Pay-back*, también denominado plazo o periodo de recuperación, es uno de los llamados métodos de selección estáticos. Se trata de una técnica que tienen las empresas para hacerse una idea aproximada del tiempo que tardarán en recuperar el desembolso inicial en una inversión. Se podría definir específicamente como el tiempo en que se tarda en recuperar (amortizarse) el desembolso inicial A.

Esta herramienta es útil para la decisión de aceptar solo los proyectos e inversiones que devuelvan dicho desembolso inicial en el plazo de tiempo que se estime adecuado.

Si los flujos netos de caja fueran constantes:  $Q_1=Q_2=\dots=Q_n$ , el plazo de recuperación vendría dado por la fórmula:  $P = A/Q$ .

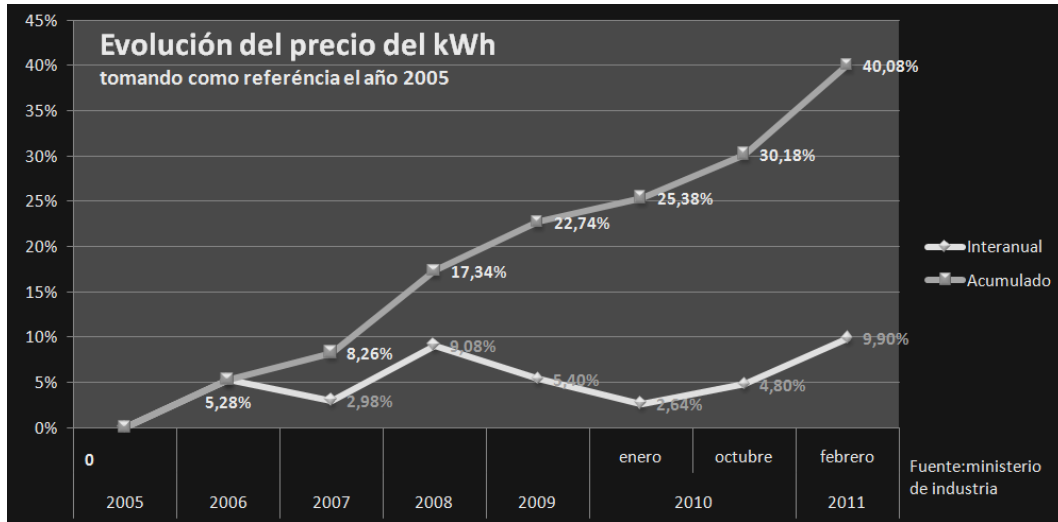


Figura 45: Evolución del precio del kWh. (Industria, 2011)

Si los flujos netos de caja no son constantes, como es nuestro caso. Los flujos de caja corresponden al ahorro conseguido con la instalación de los materiales de cambio de fase. Nuestro ahorro aumentará a medida que el precio de la electricidad aumente con el paso de los años. Tomando de referencia la Figura 45, en la que se muestra el crecimiento del precio de la energía eléctrica. Para el cálculo del periodo de retorno se han tomado distintas medias del aumento en el precio del kWh por año. Teniendo esto en cuenta, el plazo de recuperación se calculará acumulando los sucesivos flujos de caja hasta que su suma sea igual al desembolso inicial A.

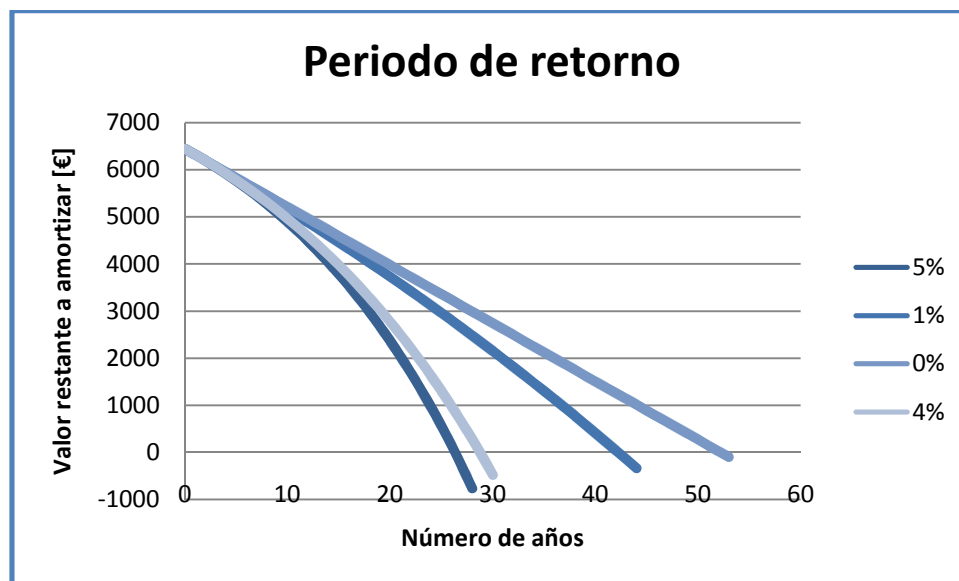


Figura 46: Periodo de retorno para distintos aumentos sobre el precio de la electricidad. (Elaboración propia)

El periodo de retorno varía en función del precio de la electricidad.

Aumento del precio de la electricidad por año [%]	Periodo de retorno de la inversión [años]
0	52
1	42
4	28
5	26

Tabla 52: Periodo de retorno en función del aumento en % del precio del kWh de la electricidad.  
(Elaboración propia)



**ANÁLISIS TÉRMICO DE LA  
APLICACIÓN DE MATERIALES DE  
CAMBIO DE FASE EN CLIMATIZACIÓN**

**Departamento de  
Ingeniería Térmica y de  
Fluidos**

---



## 11. CONCLUSIONES

### 11.1. CONCLUSIONES FINALES

Según los resultados obtenidos, la forma de almacenamiento térmico mediante calor latente (con PCM) ofrece una serie de ventajas sobre los sistemas convencionales de almacenamiento por calor sensible. Esta es la razón por la cual se ha llevado a cabo este proyecto, utilizando PCM como alternativa a los cerramientos convencionales.

A continuación se detallan los resultados obtenidos:

Después de comparar diversos materiales de cambio de fase se ha llegado a la conclusión de que el ideal para la vivienda ha resultado ser SP25 A8, con una temperatura de cambio de estado de 26°C y las siguientes propiedades termodinámicas.

PCM elegido	$\lambda_{\text{SÓLIDO}}$ [W/m·K]	$\lambda_{\text{LÍQUIDO}}$ [W/m·K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$h_f$ [kJ/kg]	$T_f$ [°C]
SP25 A8	0,600	0,598	1380	180	26

Tabla 53: PCM elegido. (Elaboración propia)

La cantidad necesaria de PCM en la aplicación propuesta para una vivienda de 90 m<sup>2</sup> ha sido 1400 kg. Se han distribuido por toda la fachada (77,6m<sup>2</sup>) y se encuentran rellenando contenedores de plástico de 2,5 mm de espesor.

El ahorro logrado supone hasta un 57% del consumo eléctrico teniendo en cuenta sólo los gastos en climatización.

Por consiguiente, los gases emitidos a la atmósfera han sido reducidos a más de la mitad. Además, este tipo de PCM no es tóxico y no se deteriora con facilidad.

El tiempo de amortización de la instalación de PCM es el principal problema. Con los datos obtenidos se ha llegado a la conclusión de que el plazo de amortización puede variar entre 26 y 50 años dependiendo de la evolución del precio de la electricidad a lo largo de los años. También se ha de tener en cuenta que con el paso del tiempo, el uso de PCM en edificaciones comenzará a ser más usual y con ello bajará su precio. De esta forma, se conseguirá amortizar la inversión inicial en menos años.

Como conclusión, el uso de estas sustancias puede aportar grandes beneficios energéticos a los edificios bioclimáticos que quieran reducir su dependencia energética en climatización, captando y acumulando la energía que aporta gratuitamente la naturaleza. Sus ventajas con respecto a los sistemas sensibles son evidentes, y sólo queda diseñar los sistemas constructivos que permitan su integración sencilla y económica en los edificios. En este proyecto se ha demostrado una opción posible, pero se está investigando en otras soluciones que también podrán ser viables en el futuro.

## 11.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El futuro de la investigación en la energía está claro: debemos desarrollar y extender nuevas tecnologías para reducir la demanda energética, incrementar el suministro energético utilizando fuentes de energía renovables, y usar de forma eficiente la energía disponible.

El uso de materiales de cambio de fase abre un campo de investigación muy interesante, y una posterior vía de desarrollo. Ciertas partes de este área ya se encuentran bajo investigación, principalmente en aplicaciones de baja - media temperatura.

Hoy en día existe un importante futuro en I+D, en cuanto al 'screening' de PCM, la microencapsulación/macroencapsulación, el desarrollo de nuevos materiales y sistemas de almacenamiento e incluso la incorporación de sistemas de almacenamiento con PCM en plantas termosolares de generación directa de vapor. Más a largo plazo, la investigación en nanofluidos y nano-PCM puede suponer un importante avance en la aplicación de las tecnologías basadas en PCM.

Una futura línea de investigación, donde el estado del arte no está muy desarrollado pero existen diversos estudios, es la incorporación de materiales de cambio de fase en tejidos inteligentes. En el uso en textiles, la parafina es utilizada en estado líquido o sólido. La parafina encapsulada se aplica sobre fibras acrílicas, y en espumas de poliuretano se utilizan recubriendo en la superficie de la estructura del textil. Su principal objetivo es proporcionar un equilibrio entre el calor generado por el cuerpo mientras se practica una actividad física y el calor liberado al ambiente.

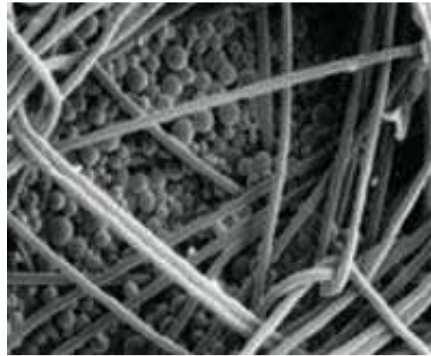


Figura 47: PCM en los textiles. (Europeenne, IIIC, & MATEO)



**ANÁLISIS TÉRMICO DE LA  
APLICACIÓN DE MATERIALES DE  
CAMBIO DE FASE EN CLIMATIZACIÓN**

**Departamento de  
Ingeniería Térmica y de  
Fluidos**

---

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] York Aire Acondicionado. (2009). *Tarifa 2009: Gama Doméstica, Residencial y RMV*. Jonhson Controls.
- [2] Abhat, A. (1983). *Low temperatura latent heat thermal energy storage: heat storage materials*. . Solar Energy.
- [3] Acha román, C., Neila González, F., Higuera García, E., & Bedoya Frutos, C. (2008). *Los materiales de Cambio de Fase (MCF) empleados para la acumulación de energía en la arquitectura. Su aplicación en el prototipo Magic Box*. Madrid.
- [4] Alonso, J. L. (2011). *RedALUMNI del Máster ERMA: Red Internacional de alumnos/as, ex-alumnos/as y colaboradores del Máster en Energías Renovables y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Madrid [UPM]*. . Recuperado el 9 de 2011, de <http://mermaredalumni.blogspot.com/>
- [5] Barreneche, R. O. *Eficiencia y uso racional de la energía en el acondicionamiento térmico de edificios*. En *Energía y Cambio Climático*. ECC.
- [6] BASF. *BASF the Chemical Company*. Recuperado el 2011, de [www.basf.es](http://www.basf.es)
- [7] Carrier. (1994). *Manual de aire acondicionado*. Marcombo.
- [8] *Construmática*. Obtenido de <http://www.construmatica.com>
- [9] Crivelli, L. A., & Idelshon, S. R. (1985). *Solución numérica del problema de transmisión de calor con cambio de fase*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [10] Del Pozo Pérez, Á. (2010). *Situación y futuro de los PCM (Phase Change Materials)*. Álava.
- [11] Domínguez Alonso, M. (2010). *Aplicaciones de los materiales de cambio de fase (PCM) en la climatización y en la construcción*.
- [12] Domínguez, M. (2009). *La acumulación de frío con materiales de cambio de fase. Microencapsulación*. Instituto del Frío. CSIC.

- [13] Domínguez, M. *Los acumuladores de cambio de fase en la construcción sostenible*. Instituto del Frío. CSIC.
- [14] Domínguez, M., & Santamaría, S. (2001). *Importancia de la inercia térmica de los cerramientos*. Conarquitectura .
- [15] Domínguez, M., Arias, J. M., García, C., & Culubret, J. *Posibilidades de los acumuladores de cambio de fase en la climatización*. Instituto del Frío .
- [16] Domínguez, M., García, C., & Arias, J. *Los materiales de cambio de fase (PCM) en la construcción*. Departamento de Ingeniería. Instituto del Frío. CSIC.
- [17] Europeenne, P. C., IIIC, I., & MATEO. *Un estado del arte de los Textiles Inteligentes*.
- [18] Frank P. Incropera, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. PEARSON.
- [19] *Fundación Vida Sostenible*. (2011). Recuperado el 10 de 2011, de [www.vidasostenible.org](http://www.vidasostenible.org)
- [20] Hasnain, S. (1998). *Review on sustainable Thermal Energy storage Technologies*. En *Energy Convers*. Pergamon.
- [21] Hauer, A., Mehling, H., Schossig, P., Yamaha, M., & Cabeza, L. (2001). *Energy Conservation through Energy Storage*. International Energy Agency.
- [22] Hoehn, A. *Phase Change Materials (PCMs) an Applications*. Colorado.
- [23] IDAE. (2007). *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*. Obtenido de <http://www.idae.es>
- [24] Ministerio de Industria. (2011).
- [25] Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J.-J. (2010). *A review on phase change materials integrated in building walls*. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (págs. 379-391). ScienceDirect.
- [26] Lecuona Neumann, A. (2009). *Ingeniería, sociedad y recursos energéticos*. Universidad Carlos III de Madrid.



- [27] Magic Box. (2005).
- [28] Oliver Ramírez, A. (Junio 2009). *Tesis: Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [29] OUTLAST TECHNOLOGIES/SCIENCE PHOTO LIBRARY. *sciencephoto.com*. Recuperado el 2011, de <http://www.sciencephoto.com/>
- [30] Pasupathy, A., Velraj, R., & Seeniraj, R. (2006). *Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments*. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (págs. 39-64). ScienceDirect.
- [31] Roca York, A. A. (2008). *Catálogo Doméstico y Residencial 2008*. Johnson Controls.
- [32] Romo, S., & Balañá, M. *Facultat de Química Universitat Rovira i Virgili*. Recuperado el 2011, de <http://www.fq.urv.cat/>
- [33] Rougeron, C. (1977). *Aislamiento acústico y térmico en la construcción*. Barcelona, España: Editores técnicos asociados, s.a.
- [34] Santillana. *Kalipedia*. Recuperado el 09 de 2011, de *Kalipedia*: [www.Kalipedia.com](http://www.Kalipedia.com)
- [35] Schoeller. Obtenido de <http://www.schoeller-textiles.com/en/technologies/schoeller-pcm.html>
- [36] SENDECO2. *SENDECO2*. Recuperado el 15 de 9 de 2011, de <http://www.sendeco2.com/>
- [37] Terés Zubiaga, J., Campos Celador, Á., Pérez Iribarren, E., González Pino, I., & Sala Lizarraga, J. (2011). *Materiales de Cambio de Fase en la Rehabilitación de Vivienda Social. II European Conference on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Planning*. Donostia.
- [38] Vidal Jiménez, B. (2007). *Modelización del cambio de fase sólido líquido. Aplicación a sistemas de acumulación de energía térmica*. Centro Tecnológico de Transferencia de Calor. UPC.
- [39] Ministerio de Vivienda. (Marzo 2006). *Código Técnico de la Edificación*.



- [40] Voelker, C., Kornadt, O., & Ostry, M. (2008). *Temperature reduction due to the application of phase change materials*. En *Energy and Buildings* (págs. 937-944). ScienceDirect.



## ANEXOS

### ANEXO I: CÁLCULO DE CARGAS

#### CÁLCULO DE LOS CERRAMIENTOS

##### FACHADAS

MATERIAL	e [m]	$\lambda$ [W/mK]	R <sub>sólido</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	R <sub>líquido</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	R <sub>p.int</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	R <sub>p.ext</sub> [m <sup>2</sup> K/W]
CONVECCIÓN INTERIOR			0,130	0,130	0,130	
REVESTIMIENTO DE MORTERO DE CEMENTO	0,01	1,3	0,008	0,008	0,008	
1/2 PIE LADRILLO PERFORADO	0,115	0,694	0,166	0,166	0,166	
REVESTIMIENTO DE MORTERO DE CEMENTO	0,01	1,3	0,008	0,008	0,008	
CÁMARA DE AIRE VERTICAL SIN VENTILAR	0,1		0,190	0,190	0,190	
ESPUMA DE POLIURETANO	0,04	0,05	0,800	0,800	0,800	
MCF	0,014	0,6/0,59	0,023	0,023		
LADRILLO HUECO DOBLE	0,07	0,444	0,158	0,158		0,158
ENLUCIDO DE YESO	0,02	0,4	0,050	0,050		0,050
CONVECCIÓN EXTERIOR			0,040	0,040		0,040
ESPEJOR TOTAL [m]	0,37	$\Sigma R$	1,572	1,572	1,301	0,248
		K	0,636	0,636	0,769	4,038



### PAREDES INTERIORES

MATERIAL	e [m]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
CONVECCIÓN EXTERIOR			0,130
MORTERO DE CEMENTO	0,02	1,4	0,014
LADRILLO PERFORADO	0,1	0,76	0,132
FIBRA DE VIDRIO (TIPO III)	0,05	0,033	1,515
LADRILLO HUECO	0,1	0,49	0,204
MORTERO DE CEMENTO	0,02	1,4	0,014
ENLUCIDO DE YESO	0,02	0,3	0,067
CONVECCIÓN INTERIOR			0,130
ESPELOR TOTAL [m]	0,31	$\Sigma R$	2,206
		K paredes int.	0,453

### TECHO

MATERIAL	e [m]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
CONVECCIÓN INTERIOR			0,100
FORJADO RETICULADO	0,3	2	0,150
VIGUETAS SEMIRRESISTENTES			
BOVEDILLA CERÁMICA			
NEGATIVO DE ACERO C-500			
HORMIGÓN ARMADO HA-25/B/20/IA			
ASLAMIENTO DE ESPUMA DE POLIURETANO	0,1	0,05	2,000
RASILLA 25x50x4	0,04	0,49	0,082
MORTERO DE CEMENTO	0,02	0,8	0,025
RASILLÓN 1x30x4	0,04	0,7	0,057
MORTERO DE CEMENTO	0,02	0,8	0,025
LÁMINA IMPERMEABILIZANTE	0,003	0,19	0,016
MORTERO DE CEMENTO	0,02	0,8	0,025
TEJAS TIPO ÁRABE DE CERÁMICA ROJA	0,02	1,3	0,015
CONVECCIÓN EXTERIOR			0,040
ESPELOR TOTAL [m]	0,543	$\Sigma R$	2,535
		K techo	0,394



## PUERTAS

MATERIAL	b [m]	c [m]	e [m]	K [W/m²K]	R [m²K/W]
INTERIOR	0,8	2	0,05	4	0,13
PUERTA EXTERIOR: MADERA ACRISTALAMIENTO SIMPLE <30%					0,25
EXTERIOR					0,04
PUERTAS INTERIORES				2	
				$\Sigma R$	0,42
				K puerta	2,381

## SUELO

MATERIAL	e[m]	$\lambda$ [W/mK]	R [m²K/W]
CONVECCIÓN INTERIOR			0,100
PLAQUETA O BALDOSA DE GRES	0,015	2,3	0,007
MORTERO DE CEMENTO	0,15	1,3	0,115
POLIESTIRENO (PS)	0,15	0,16	0,938
MORTERO DE CEMENTO	0,2	1,3	0,154
HORMIGÓN ARMADO	0,8	2,5	0,320
CONVECCIÓN EXTERIOR			0,170
ESPESOR TOTAL	1,315		
		$\Sigma R$	1,633
		K suelo	0,612

## CARGAS EXTERIORES

### CARGAS POR TRANSMISIÓN

ORIENTACIÓN		K [W/m <sup>2</sup> C]	A [m <sup>2</sup> ]	DTE	Q sólido [W]	Q líquido [W]	Q cambio de fase[W]
PARED	N	0,636	19,2	2,2	26,868	26,868	29,514
	E	0,636	18,3	10	116,401	116,401	28,130
	S	0,636	17,4	8,9	98,502	98,502	26,747
	O	0,636	22,5	6,7	95,888	95,888	34,586
TECHO		0,394	180	19,4	1377,542	1377,542	154,398
VENTANA	N	3,300	5,8	2,2	42,108	42,108	42,108
	E	3,300	2,6	10	85,800	85,800	85,800
	S	3,300	7,6	6,7	168,036	168,036	168,036
SUELO		0,612	90	5	-275,524	-275,524	-275,524
PUERTA	E	2,381	1,6	10	38,095	38,095	38,095

### CARGAS DEBIDA A LA RADIACIÓN

	ORIENTACIÓN	A [m <sup>2</sup> ]	I <sub>T</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	φ	Q [W]
VENTANA COCINA	SUR	1,8	187	0,9	302,94
VENTANA COCINA	ESTE	1,8	444	0,9	719,28
VENTANA ASEO	ESTE	0,8	444	0,9	319,68
VENTANA DORMITORIO 1	SUR	1,8	187	0,9	302,94
VENTANA DORMITORIO 2	NORTE	1,8	40	0,9	64,80
VENTANA SALÓN	NORTE	4	40	0,9	144,00
VENTANA SALÓN	SUR	4	187	0,9	673,20



## CARGAS INTERIORES

### CARGA DEBIDA A OCUPANTES

	VALOR ÍNDICE [W]	Nº OCUPANTES	FACTOR SIMULTANEIDAD	Q [W]
LATENTE	60	4	0,75	180
SENSIBLE	70	4	0,75	210

### CARGA SENSIBLE DEBIDO A EQUIPOS

EQUIPOS	POT.[W]	Nº EQUIPOS	FS	Q [W]
PLANCHA	1200	1	0,036	42,85
ASPIRADORA	1200	1	0,024	28,57
TV	150	1	0,250	37,5
CAFETERA	700	1	0,042	29,16
HORNO MICROONDAS	1200	1	0,010	12,5
ORDENADOR	150	1	0,167	25
AIRE ACONDICIONADO	2950	1	0,333	983,33
LAVADORA	3000	1	0,048	142,85
HORNO ELÉCTRICO	3500	1	0,010	36,45
VENTILADOR	100	1	0,333	33,33
FRIGORÍFICO	200	1	0,375	75
LAVAVAJILLAS	2300	1	0,060	136,9
PEQUEÑOS ELECT.	1000	1	0,042	41,667
VITROCERÁMICA	3000	1	0,083	250
SECADORA	3000	1	0,048	142,85

### CARGA LATENTE POR VENTILACIÓN

AIRE EXTERIOR	V [m³]	ρ [kg/m³]	RELACIÓN DE HUMEDAD INTERIOR [g/g]	RELACIÓN DE HUMEDAD EXTERIOR [g/g]	Q [W]
JUNIO	0,091	1,2	0,01113	0,00549	1491,60
JULIO	0,091	1,2	0,01113	0,00547	1496,91
AGOSTO	0,091	1,2	0,01113	0,00483	1666,25
SEPTIEMBRE	0,091	1,2	0,01113	0,00532	1536,69



### CARGA SENSIBLE POR VENTILACIÓN

MES DEL AÑO	CAUDAL [m³/s]	$\rho$ [kg/m³]	$C_p$ [J/kg°C]	$T_{int}$ [°C]	$T_{ex}$ [°C]	FACTOR SIMULTANEIDAD	$Q_{sensible}$ [W]
JUNIO	0,091	1,2	1005	25	31,66	0,75	548,18
JULIO	0,091	1,2	1005	25	38,07	0,75	1075,78
AGOSTO	0,091	1,2	1005	25	36,35	0,75	934,21
SEPTIEMBRE	0,091	1,2	1005	25	31,25	0,75	514,43

### RESULTADOS

Carga debida a ocupantes [W]	Carga por iluminación [W]	Carga debida a equipos [W]	Carga por radiación [W]	Carga por transmisión sólido [W]	Carga por transmisión líquido [W]
450	720	2018	2526	1773,7	1773,6

MESES	Carga latente por ventilación [W]	Carga sensible por ventilación [W]
JUNIO	1491,60	548,18
JULIO	1496,91	1075,78
AGOSTO	1666,25	934,21
SEPTIEMBRE	1536,69	514,43

MESES	Carga total PCM sólido [W]	Carga total PCM líquido [W]	Carga total sin PCM [W]
JUNIO	10619,322	10619,31	10619,284
JULIO	10624,908	10624,88	10624,704
AGOSTO	10802,712	10802,691	10818,852
SEPTIEMBRE	10666,662	10666,658	10666,312

MESES	UA parcial PCM estado líquido [W/K]	UA parcial PCM estado sólido [W/K]	UA pared del exterior a PCM [W/K]	UA global sin PCM [W/K]
JUNIO	988,304	988,303	312,528	988,301
JULIO	765,930	765,926	312,528	765,912
AGOSTO	745,151	745,143	312,528	745,120
SEPTIEMBRE	1030,995	1030,993	312,528	1030,962



## ANEXO II: DATOS TÉCNICOS AIRE ACONDICIONADO

### SPLIT MURAL INVERTER BGT

UNIDAD INTERIOR		DBMI 25 BGT	DBMI 35 BGT
UNIDAD EXTERIOR		DBOI 25 BGT	DBOI 35 BGT
Capacidad frigorífica	kW	2,5 (1,0 - 3,2)	3,5 (1,4 - 4,6)
Capacidad frigorífica	Kcal/h	2 150 (860 - 2 800)	3 010 (1 200 - 3 900)
Capacidad calorífica	kW	2,7 (1,1 - 3,5)	3,9 (1,5 - 4,9)
Capacidad calorífica	Kcal/h	2 320 (950 - 3 000)	3 270 (1 300 - 4 250)
Compresor	Tipo	Rotativo	
Refrigerante		R410A	
Alimentación	V/Ph/Hz	230 / 1 / 50 + T	
Consumo	Refrigeración kW	0,7	1,1
	Calefacción kW	0,8	1,2
EER		3,4	3,2
COP		3,4	3,4
Clase energética	Refrigeración	A	A
	Calefacción	B	B
Caudal nominal unidad int.	m³/h	450	500
Nivel de presión sonora	Interior dB(A)	27	29
	Exterior dB(A)	48	49
Dimensiones	Unidad interior	A (mm)	290
		An (mm)	1005
		P (mm)	150
	Unidad exterior	A (mm)	540
		An (mm)	848
		P (mm)	320
Peso neto	Unidad exterior kg	11	11
	Unidad exterior kg	40	40
Diámetro conexiones	Gas	3/8"	1/2"
	Líquido	1/4"	1/4"
Carga de refrigerante	g	1 200	1 270
Precarga	m	4	5
Carga adicional	g/m	8	8
Tubería	Longitud m	15	15
	Altura m	8	8

Capacidades frigoríficas nominales basadas en : - Temperatura de aire interior 27°C BS / 19°C BH - Temperatura de aire exterior 35°C BS  
Capacidades caloríficas nominales basadas en : - Temperatura de aire interior 21°C BS - Temperatura de aire exterior 7°C BS/6°C BH



# ANÁLISIS TÉRMICO DE LA APLICACIÓN DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN CLIMATIZACIÓN

Departamento de  
Ingeniería Térmica y de  
Fluidos

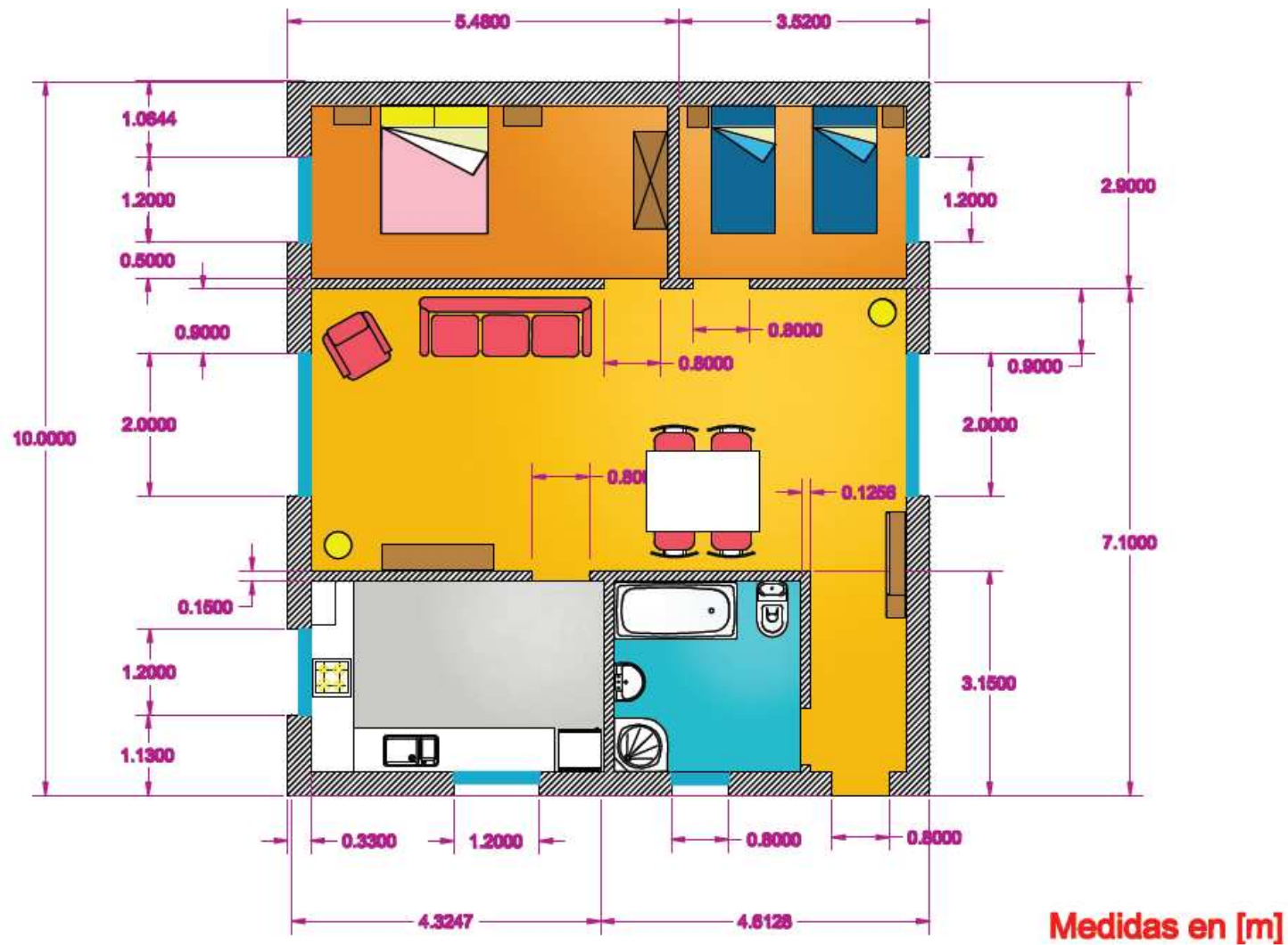
## SPLIT MURAL INVERTER BGY

UNIDAD INTERIOR		DBMI 25 BGY	DBMI 35 BGY	DBMI 50 BGY	DBMI 60 BGY	
UNIDAD EXTERIOR		DBOI 25 BGY	DBOI 35 BGY	DBOI 50 BGY	DBOI 60 BGY	
Capacidad frigorífica	kW	2,6 (1,3 - 3,2)	3,5 (0,7 - 4,1)	5,3 (2,5 - 5,8)	6,5 (2,0 - 6,8)	
Capacidad frigorífica	Kcal/h	2 236 (1 120 – 2 700)	3 010 (640 – 3 500)	4 550 (2 150 - 7 140)	5 600 (1 720 – 5 850)	
Capacidad calorífica	kW	3,0 (1,5 - 3,9)	4,0 (0,8 - 4,5)	5,9 (2,3 - 6,4)	6,5 (1,6 - 8,2)	
Capacidad calorífica	Kcal/h	2 500 (1 290 – 3 300)	3 440 (750 – 3 870)	5 074 (1 980 – 5 500)	5 600 (1 380 – 7 000)	
Compresor	Tipo	Rotativo				
Refrigerante		R410A				
Alimentación	V/Ph/Hz	230 / 1 / 50 + T				
Consumo	Refrigeración kW	0,7	1,1	1,6	2	
	Calefacción kW	0,8	1,1	1,6	1,8	
EER		3,4	3,4	3,4	3,2	
COP		3,6	3,6	3,6	3,6	
Clase energética	Refrigeración	A	A	A	A	
	Calefacción	A	A	A	A	
Caudal nominal unidad int.	m³/h	490	550	675	675	
Nivel de presión sonora	Interior dB(A)	27	33	35	35	
	Exterior dB(A)	48	50	51	51	
Dimensiones	Unidad interior	A (mm)	250	285	310	310
		An (mm)	770	830	1020	1020
		P (mm)	190	189	228	228
	Unidad exterior	A (mm)	540	540	680	840
		An (mm)	848	848	913	1018
		P (mm)	320	320	378	412
Peso neto		Unidad exterior kg	8,5	11	13	13
		Unidad exterior kg	35	40	52	68
Diámetro conexiones		Gas	3/8"	1/2"	1/2"	5/8"
		Líquido	1/4"	1/4"	1/4"	3/8"
Carga de refrigerante	g	870	1270	1600	2400	
Precarga	m	4	4	5	5	
Carga adicional	g/m	20	30	30	40	
Tubería		Longitud m	15	15	22	26
		Altura m	8	8	12	16

Capacidades frigoríficas nominales basadas en: Temperatura de aire interior 27°C BS / 19°C BH - Temperatura de aire exterior 35°C BS  
Capacidades caloríficas nominales basadas en: Temperatura de aire interior 21°C BS - Temperatura de aire exterior 7°C BS/6°C BH



## ANEXO III: PLANO DE LA VIVIENDA



Altura de la planta= 2,5 m.